

明 細 書

窒化物半導体素子およびその製造方法

技 術 分 野

5 本発明は、窒化物半導体素子に関し、特に光電子情報処理装置および照明光源などへの応用が期待されている半導体発光素子や、ハイポーラ型トランジスタを含む窒化物半導体素子、ならびにそれらの製造方法に関する。

背 景 技 術

10 V族元素として窒素（N）を有するⅢ－Ⅴ族窒化物半導体は、そのバンドギャップの大きさから、短波長発光素子の材料として有望視されている。中でも窒化ガリウム系化合物半導体（GaN系半導体：AlGaInN）は研究が盛んに行われ、青色発光ダイオード（LED）、緑色LEDが既に実用化されている。また、光ディスク装置の大容量化のために、400nm帯に発振波長を有する半導体レーザが熱望されており、GaN系半導体を材料とする半導体レーザが注目され現在では実用レベルに達しつつある。

15 GaN系半導体レーザは、例えば特開平10-126006号公報、Japanese Journal of Applied Physics, Vol.38, L226-L229（1999）、physica status solidi（a）194, No. 2, 407-413（2002）などに開示されている。

20 以下、図1および図2を参照しながら、従来のGaN系半導体レ

ーザを説明する。

まず、図1(a)を参照する。

図1(a)に示される半導体レーザは、低転位のELO-GaN
基板101と、ELO-GaN基板101上にエピタキシャル成長
5 した窒化物半導体の積層構造とを有している。ELO-GaN基板
101は、選択横方向成長(Epitaxial Lateral
Overgrowth)によって作製されたGaNの厚膜から構成
される。

図1(a)における半導体積層構造は、基板101の側から、n
10 -Al_{0.015}Ga_{0.985}Nコンタクト層102、Ga_{0.95}In<sub>0.
05</sub>Nクラック抑制層103、n-Al_{0.15}Ga_{0.85}N/n-G
aN超格子(SLs)クラッド層104、GaN光ガイド層105、
Ga_{0.86}In_{0.14}N/Ga_{0.99}In_{0.01}N多重量子井戸(MQ
W)活性層106、p-Al_{0.20}Ga_{0.80}Nキャップ層107、
15 GaN光ガイド層108、p-Al_{0.15}Ga_{0.85}N/p-GaN
-SLsクラッド層109、およびp-GaNコンタクト層110
を有している。これらの半導体層の結晶成長は、例えば有機金属気
相成長法(MOVPE法)を用いて行なわれる。

上記の構成を有する半導体積層構造は、図1(a)に示す形状に
20 加工され、その上にp電極111、SiO₂層112、およびn電
極113が形成されている。

図1(b)は、この半導体レーザの伝導帯側バンド構造を模式的
に示している。図1(b)の横軸は基板表面から距離に対応してお

り、図中の左側に進むほど基板表面から遠ざかる。縦軸は、伝導帯下端のエネルギーレベルである。

この半導体レーザの特徴は、結晶成長中における活性層からの In 蒸発の抑制と活性層からの電子のオーバーフローを抑制するために、最も禁制帯幅が大きい $\text{p-Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{N}$ キャップ層 107 が MQW 活性層 106 の直上に形成されていることである。

次に、図 2 (a) を参照して、他の GaN 半導体レーザを説明する。

この半導体レーザは、図 1 (a) の半導体レーザと同様に、 EL O-GaN 基板 201 と、その上に形成された半導体積層構造とを有している。半導体積層構造は、 n-GaN コンタクト層 202、 $\text{n-Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{N}$ クラッド層 203、 GaN 光ガイド層 204、 $\text{Ga}_{0.90}\text{In}_{0.10}\text{N}/\text{Ga}_{0.98}\text{In}_{0.02}\text{N-MQW}$ 活性層 205、 GaInN 中間層 206、 AlGaInN 中間層 207、 $\text{p-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ 電子ブロック層 208、 $\text{p-Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{p-GaN-SLs}$ クラッド層 209、 p-GaN コンタクト層 210 を有している。

この半導体積層構造は、図 2 (a) に示す形状に加工され、その上に p 電極 211、 SiO_2 層 212、および n 電極 213 が形成されている。

この半導体レーザにおける伝導帯側バンド構造の模式図を図 2 (b) に示す。この半導体レーザの特徴は、 p 型不純物をドーピングした層による光吸収損失をできるだけ低減するために、MQW 活

性層205と $p\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ 電子ブロック層208の間に GaInN 中間層206、 AlGaInN 中間層207と呼ばれるスペーサー層を形成していることである。また、 GaInN 中間層206および AlGaInN 中間層207が光ガイド層としても機能するため、図1(a)に示す半導体レーザとは異なり、 p 側の光ガイド層が形成されていない。

このような構造を有する GaInN 半導体レーザは、いずれも、室温における出力30mWでの連続発振を達成することが報告されている。

しかしながら、図1(a)および(b)に示す構造を有する半導体レーザの場合、レーザ構造中で最も格子定数の大きい活性層106の直上に、最も格子定数が小さい AlGaInN キャップ層104が接し、大きな歪が活性層106に加えられることになり、レーザ素子作製時の均一性、再現性があまり良好ではない。

一方、図2(a)および(b)に示す構造を有する半導体レーザの場合は、活性層205と AlGaInN 電子ブロック層(図1の AlGaInN キャップ層107と同一の機能を果たす)の間に、中間層が挿入されている。このため、活性層に印加される歪が効果的に緩和され、レーザ素子作製時の均一性が向上する。

これらの半導体レーザで共通するのは、 p 型結晶を実現するアクセプタ不純物のドーピングを、レーザ構造中で最もバンドギャップが大きい AlGaInN キャップ層(AlGaInN 電子ブロック層)の成長を行なう時から開始していることである。

窒化物系半導体では、アクセプタ不純物として通常マグネシウム (Mg) がよく用いられる。このMgには、結晶成長時のドーピングに際して「メモリー効果」と呼ばれる現象が発生することが知られている。「メモリー効果」とは、結晶成長中に不純物ドーピングを開始した時点から、実際に結晶中にドーピングされた不純物を取り込まれるまでに、時間遅れが生じることに起因して発生する。より具体的には、このようなメモリー効果が生じると、ドーピング開始位置が、意図した位置よりも結晶の成長表面側にずれたり、不純物濃度の深さ方向分布における濃度の増加が急峻ではなく裾を引いてしまう。

また「メモリー効果」は、上記の場合とは逆に、結晶成長中にドーピングを終了した時点から、実際に結晶中にドーピングされた不純物の取り込みが終了するまでに時間遅れを生じさせる。この場合は、ドーピング終了位置が意図した位置よりも結晶成長層の表面側にずれたり、不純物濃度の深さ方向分布におけるMg濃度の低下が急峻ではなく裾を引いてしまう。

Mgのドーピング開始位置を、レーザ構造中で最もバンドギャップの大きいAlGa_{0.3}Nキャップ層 (AlGa_{0.3}N電子ブロック層) の成長開始位置に合わせた場合において、このメモリー効果が発生すると、AlGa_{0.3}Nキャップ層 (AlGa_{0.3}N電子ブロック層) 中にMg濃度が局所的に低くなる部分が発生する。

一般にアクセプタ不純物の活性化エネルギーはバンドギャップエネルギーが大きくなるほど、言い換えれば、結晶中のAl組成が高くな

るほど大きくなる傾向がある。メモリー効果に起因したMgドーピング遅れによってMg濃度の低い部分が形成されると、その部分でMgが十分に活性化されず、AlGaIn電子ブロック層の機能が低下してしまう。

5 特開2000-143396号公報に記載されている他の従来例では、p型GaIn結晶を作製する場合に $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以下のAlをドーピング（バンドギャップエネルギーがGaInから変化しない程度なのでAlGaIn混晶化ではない）している。これにより、Mgがドーピングされたことによる結晶の歪を緩和し、アクセプタ
10 不純物であるMgをGaIn結晶中のGa原子位置に効果的に配置し、高ホール濃度を得られると説明している。しかしながら、Alドーピングを施してもMg濃度自身は一定値であり、最適なAl濃度を制御すれば、アクセプタの活性化率が向上して高ホール濃度を実現できるが、ドーピング界面におけるメモリー効果の抑制と、制御性、
15 急峻性の高いアクセプタ不純物プロファイルに関しては説明されていない。

特開2002-198314号公報に記載されている更に他の従来例では、Mgドーピングプロファイルの急峻性を向上させるために、AlGaIn層/GaIn層もしくはGaInN層/GaIn層の多重ヘテロ構造（超格子構造）を作製し、そこにMgドーピングを行っている。この方法によればMgを一様にドーピングしていても、
20 GaIn層とAlGaIn層もしくはGaIn層とGaInN層とのヘテロ界面のAlGaIn層もしくはGaInN層の基板側（成長開始

側)の界面近傍でMg濃度が局所的に増大する。そして、このMg濃度が局所的に増大する現象を利用し、積極的に界面を形成して急峻性を向上させている。しかしながら、この方法では急峻性は向上しているものの、バンドギャップの大きいAlGaN層中では依然としてMgドーピング遅れが、生じており、AlGaN層中にはMg濃度不均一が生じている。また、多数のヘテロ界面を形成することにより結晶中にはMg濃度の過不足が不規則に発生し、制御性、再現性が非常に低い。

これらのことに鑑み、本発明者らは、図3(a)に示すようなレーザ構造を作製した。図3(a)の素子は、ELO-GaN基板301を有している。ELO-GaN基板301は、ABLEG(Air-Bridged Lateral Epitaxial Growth)基板であり、不図示のエアギャップ構造を有している。ABLEGの詳細は、例えば特開2002-009004号公報に開示されている。

基板301上の半導体積層構造は、n-GaNコンタクト層302、n-Al_{0.07}Ga_{0.93}Nクラッド層303、n-GaN光ガイド層304、Ga_{0.90}In_{0.10}N/Ga_{0.98}In_{0.02}N-MQW活性層305、GaInN中間層306、GaN中間層307、p-GaNアクセプタ不純物ドーピング開始層308、p-Al_{0.16}Ga_{0.84}N電子オーバーフロー抑制層309、p-Al_{0.14}Ga_{0.86}N/p-GaN-SLsクラッド層310、p-GaNコンタクト層311を含んでいる。図3(b)は、このレーザ構造

の伝導帯側バンド構造を模式的に示している。

このレーザ構造の特徴は、レーザ構造中で最もバンドギャップが大きい $\text{p-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ 電子オーバーフロー抑制層 309 の成長開始とともにアクセプタ不純物のドーピングを開始するのではなく、その前に p-GaN アクセプタ不純物ドーピング開始層 308 を設けていることである。この p-GaN アクセプタ不純物ドーピング開始層 308 中には、メモリー効果に起因したドーピング遅れが存在するが、それを考慮した膜厚設計を行うことにより、 $\text{p-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ 電子オーバーフロー抑制層 309 の Mg ドーピング濃度を一定にすることができるようになる。

しかしながら、これら従来の成長方法では、レーザ構造中で最もバンドギャップエネルギーが大きい $\text{p-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ 電子オーバーフロー抑制層 309 の Mg 濃度は一定値となるものの、メモリー効果に起因してドーピングの開始及び終了に時間遅れが生じるために Mg のドーピングプロファイルの急峻性が低く、結果としてクラッド層の Mg 濃度に対して 50% から 70% 程度の Mg 濃度しか $\text{p-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ 電子オーバーフロー抑制層 309 にはドーピングされておらず Mg の絶対量としては不足している。このため、活性層へのホールの注入効率が低下し十分な低しきい値電流駆動を再現性、均一性良く実現することが困難である。また、pn 界面が活性層位置からずれることにより、しきい値電圧の上昇を招いている。

$\text{p-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ 電子オーバーフロー抑制層 309 の M

g 濃度を高めるためには p-GaN-アクセプタ不純物ドーピング
開始層 308 を十分に厚くすればよく、こうすることにより、p-
Al_{0.16}Ga_{0.84}N 電子オーバーフロー抑制層 309 の Mg 濃度
はクラッド層の Mg 濃度と同程度にできる。しかしながら、p-G
5 aN-アクセプタ不純物ドーピング開始層 308 中にも多くの Mg
が存在することになり、レーザ動作時の電流印加や、レーザに加え
られた熱、磁界によりこの Mg が容易に活性層側へ拡散する。この
結果、Mg は活性層付近にまで到達し、活性層近傍で光吸収損失を
引き起こし、レーザの信頼性に悪影響を及ぼし、再現性、均一性良
10 く、高い信頼性を有するレーザ素子を実現することが困難であった。

本発明は上記の事情を鑑みてなされたものであり、信頼性の高い
窒化物半導体素子を歩留まり良く提供することにある。

発明の開示

15 本発明の窒化物半導体素子は、p 型窒化物半導体層、n 型窒化物
半導体層、および、前記 p 型窒化物半導体層と前記 n 型窒化物半導
体層との間に挟まれている活性層を備えた窒化物半導体素子であっ
て、前記 p 型窒化物半導体層は、Al および Mg を含む第 1 p 型窒
化物半導体層と、Mg を含む第 2 p 型窒化物半導体層とを有し、前
20 記第 1 p 型窒化物半導体層は、前記活性層と前記第 2 p 型窒化物半
導体層との間に位置しており、前記第 2 p 型窒化物半導体層は、前
記第 1 p 型窒化物半導体層のバンドギャップよりも大きなバンドギ
ャップを有している。

好ましい実施形態において、前記第2 p型窒化物半導体層は、前記活性層からのキャリアオーバーフローを抑制するバリア層として機能する。

好ましい実施形態において、前記第1 p型窒化物半導体層のAl濃度は、 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $2 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 以下であり、前記第1 p型窒化物半導体層においてAl濃度が $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $2 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 以下の領域の厚さは、1 nm以上である。

好ましい実施形態において、前記第1 p型窒化物半導体層と前記活性層との間に位置し、Alを含むノンドープ窒化物半導体層を更に備えている。

好ましい実施形態において、前記ノンドープ窒化物半導体層は、前記第2 p型窒化物半導体層のバンドギャップよりも小さなバンドギャップを有している。

好ましい実施形態において、前記ノンドープ窒化物半導体層は、前記第1 p型窒化物半導体層のバンドギャップに等しいバンドギャップを有している。

好ましい実施形態において、前記ノンドープ窒化物半導体層および前記第1 p型窒化物半導体層の合計の厚さは、1 nm以上50 nm以下である。

好ましい実施形態において、前記第2 p型窒化物半導体層の厚さは、5 nm以上20 nm以下である。

好ましい実施形態において、前記第2 p型窒化物半導体層においてMg濃度が $8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以下の領域の厚さは1 nm以下である。

好ましい実施形態において、前記p型窒化物半導体層は、前記第2 p型窒化物半導体層のバンドギャップよりも小さなバンドギャップ

プを有する第3 p型窒化物半導体層を更に有し、前記第3 p型窒化物半導体層と前記第1 p型窒化物半導体層との間に前記第2 p型窒化物半導体層が位置している。

好ましい実施形態において、前記第3 p型窒化物半導体層のバンドキャップは前記第1 p型窒化物半導体層のバンドキャップよりも小さい。

好ましい実施形態において、前記第3 p型窒化物半導体層はクラッド層として機能する。

好ましい実施形態において、前記第1 p型窒化物半導体層および第2 p型窒化物半導体層の少なくとも一方はInを含む。

好ましい実施形態において、前記第2 p型窒化物半導体層のIn組成比は、前記第1 p型窒化物半導体層のIn組成比よりも大きい。

本発明による窒化物半導体素子の製造方法は、p型窒化物半導体層、n型窒化物半導体層、および、前記p型窒化物半導体層と前記n型窒化物半導体層との間に挟まれている活性層を備え、前記p型窒化物半導体層は、AlおよびMgを含む第1 p型窒化物半導体層と、Mgを含む第2 p型窒化物半導体層とを有し、前記第1 p型窒化物半導体層は、前記活性層と前記第2 p型窒化物半導体層との間に位置しており、前記第2 p型窒化物半導体層は、前記第1 p型窒化物半導体層のバンドギャップよりも大きなバンドギャップを有している窒化物半導体素子の製造方法であって、前記n型窒化物半導体層を形成する工程と、前記活性層を形成する工程と、Mgを有する原料ガスおよびAlを有する原料ガスを共に供給することによって、AlおよびMgを含む前記第1 p型窒化物半導体層を形成する工程と、Mgを有する原料ガスを供給することによって前記第2 p型窒化物半導体層を形成する工程とを含む。

好ましい実施形態において、前記第1 p型窒化物半導体層を形成する工程の前に、p型不純物を供給せずにAlを有する原料ガスを供給することによって、Alを含むノンドープ窒化物半導体層を形成する工程を更に含む。

- 5 好ましい実施形態において、前記第1 p型窒化物半導体層のAl濃度は、 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $2 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 以下であり、前記第1 p型窒化物半導体層においてAl濃度が $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $2 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 以下の領域の厚さは、1 nm以上である。

10 図面の簡単な説明

図1 (a) は、Ga N半導体レーザの従来例を示す断面図であり、図1 (b) は、その伝導帯側バンド構造の模式図である。

図2 (a) は、Ga N半導体レーザの他の従来例を示す断面図であり、図2 (b) は、その伝導帯側バンド構造の模式図である。

- 15 図3 (a) は、Ga N半導体レーザの更に他の従来例を示す断面図であり、図3 (b) は、その伝導帯側バンド構造の模式図である。

図4 (a) は、本発明の実施形態1における窒化物半導体レーザの断面構造図であり、図4 (b) は、その伝導帯側バンド構造の模式図である。

- 20 図5 (a) は、図3 (a) および (b) に示す半導体レーザにおけるSIMSプロファイルを示すグラフであり、図5 (b) は、実施形態1の半導体レーザにおけるSIMSプロファイルを示すグラフである。

図6は、p-Al Ga N-アクセプタ不純物ドーピング開始層の

A l 組成に対する p-A l G a N 電流オーバーフロー抑制層の M g 濃度を示すグラフである。

図 7 (a) は、本発明の実施形態 3 における半導体レーザを示す断面図であり、図 7 (b) は、比較例の伝導帯側バンド構造の模式図であり、図 7 (c) は、本実施形態における伝導帯側バンド構造の模式図である。

図 8 (a) は、本発明の実施形態 4 における半導体レーザを示す断面図であり、図 8 (b) は、その伝導帯側バンド構造の模式図である。

図 9 (a) は、本発明の実施形態 5 における半導体レーザを示す断面図であり、図 9 (b) は、その伝導帯側バンド構造の模式図である。

図 1 0 (a) は、本発明の実施形態 6 における半導体レーザを示す断面図であり、図 1 0 (b) は、その伝導帯側バンド構造の模式図である。

図 1 1 (a) は、本発明の実施形態 7 における半導体レーザを示す断面図であり、図 1 1 (b) は、その伝導帯側バンド構造の模式図である。

図 1 2 は、本発明の実施形態 8 における半導体レーザを示す断面図である。

図 1 3 は、実施形態 8 の半導体レーザにおける活性層近傍の伝導体バンド構造を示す模式図である。

図 1 4 は、本発明の実施形態 9 における半導体レーザを示す断面図である。

図15は、実施形態9の半導体レーザにおける活性層近傍の伝導体バンド構造を示す模式図である。

図16は、実施形態9の半導体レーザにおける活性層近傍の他の伝導体バンド構造を示す模式図である。

5

発明を実施するための最良の形態

以下、図面を参照しながら、本発明の実施形態を説明する。

(実施形態1)

10 まず、本発明による窒化物半導体素子の第1の実施形態を説明する。

図4(a)は、本実施形態の半導体レーザの断面構造を示し、図4(b)は、その伝導帯側バンド構造の模式図である。本実施形態の半導体レーザは、 n -Ga_{0.99}N基板401と、 n -Ga_{0.99}N基板401上に形成された半導体積層構造とを有している。この半導体積層構造は、基板側から、 n -Ga_{0.99}N層402、 n -Al_{0.05}Ga_{0.95}Nクラッド層403、 n -Ga_{0.99}N光ガイド層404と、Ga_{0.99}In_{0.10}N/Ga_{0.98}In_{0.02}N-MQW活性層405、ノンドープGa_{0.98}In_{0.02}N中間層406、ノンドープGa_{0.99}N中間層407、ノンドープAl_{0.03}Ga_{0.97}N中間層408、 p -Al_{0.03}Ga_{0.97}Nアクセプタ不純物ドーピング開始層409、 p -Al_{0.16}Ga_{0.84}N電子オーバーフロー抑制層410、 p -Al_{0.10}Ga_{0.90}N(2nm厚)/ p -Ga_{0.99}N(2nm厚)-SLSクラッド層(120ペア)411、および p -Ga_{0.99}Nコンタクト層412を有している。

25

ここで、 $p\text{-Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ アクセプタ不純物ドーピング
開始層 409 は「Al および Mg を含む第 1 p 型窒化物半導体層」
として機能し、 $p\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ 電子オーバーフロー抑制
層 410 は「Mg を含む第 2 p 型窒化物半導体層」として機能する。

5 図 4 (b) に示されるように、 $p\text{-Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ アクセ
プタ不純物ドーピング開始層 409 のバンドギャップは、 $p\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ 電子オーバーフロー抑制層 410 のバンドギャッ
プより小さく、 $p\text{-Al}_{0.10}\text{Ga}_{0.90}\text{N}$ (2 nm 厚) / $p\text{-Ga}$
N (2 nm 厚) - S L s クラッド層 (120 ペア) 411 における
10 バンドギャップの最大値よりも小さい。

このような半導体積層構造は、図 4 (a) に示す形状に加工され、
その上に p 電極 413、n 電極 414、および SiO_2 層 415 が
形成されている。

このような半導体レーザにおいて、n 電極 414 と p 電極 413
15 の間に電圧を印加すると、MQW 活性層 405 に向かって p 電極 413 から正孔が n 電極 414 から電子が注入され、MQW 活性層 405 で利得を生じ、410 nm の波長でレーザ発振を起こす。

以下、図 4 (a) に示す半導体レーザの製造方法の実施形態を説明する。

20 本実施形態では、MOVPE 法を用いて窒化物半導体層の結晶成長を行なう。成長圧力は減圧から、大気圧 (1 atm)、大気圧以上の加圧のいずれでも良く、各層において最適な圧力に切り替えても良い。また、原料を基板に供給するためのキャリアガスは、少なくとも窒素 (N_2) または水素 (H_2) 等の不活性ガスを含むガス
25 であることが好ましい。

なお、本発明における窒化物半導体の成長方法は、MOVPE法に限定されず、ハイドライド気相成長法（HVPE法）や分子線エピタキシ法（MBE法）など、化合物半導体結晶を成長させる全ての方法に適用することができる。

5 本実施形態では、まず、 n -Ga_{0.99}N基板401の表面を有機溶剤、酸によって清浄化した後、サセプタ上に設置し十分にN₂で置換する。N₂置換が終了した後、N₂雰囲気中、10℃/10秒の昇温レートで1000℃まで昇温する。その後、キャリアガスをH₂に切り替え、同時にアンモニア（NH₃）を供給し、1分間基板表面のクリーニングを行う。

10 次に、トリメチルガリウム（TMG）とモノシラン（SiH₄）を供給し、2μm厚の n -Ga_{0.99}N層402を成長させる。引き続き、トリメチルアルミニウム（TMA）を加え、1.5μm厚の n -Al_{0.05}Ga_{0.95}Nクラッド層403を成長させる。その後、TMAの供給を停止し、 n -Ga_{0.99}N光ガイド層404を厚さ0.1μmまで成長させる。

15 n -Ga_{0.99}N光ガイド層404成長後、キャリアガスをN₂に変えNH₃の供給を停止し、成長温度を780℃まで降温する。成長温度が780℃で安定後、まずNH₃を供給し、続いてTMGとトリメチルインジウム（TMI）を供給する。こうして、Ga_{0.90}In_{0.10}N/Ga_{0.98}In_{0.02}N-MQW活性層405を成長させる。Ga_{0.90}In_{0.10}N井戸層厚は3nm、Ga_{0.98}In_{0.02}N障壁層厚は7nmであり、井戸層数は3である。活性層には意図的なドーピングはしていない。

20 次に、30nm厚のノンドープGa_{0.98}In_{0.02}N中間層406、および30nm厚のノンドープGa_{0.99}N中間層407を成長した

後、いったんTMGの供給を停止する。その後、 N_2 と NH_3 を供給した状態で速やかに $1000^\circ C$ まで昇温し、成長温度が $1000^\circ C$ に到達後、キャリアガスを N_2 と H_2 の混合ガスに変更し、 N_2 と H_2 と NH_3 を供給した状態にする。

5 そして直ちにTMGとTMAを供給して40nm厚のノンドープ $Al_{0.03}Ga_{0.97}N$ 中間層408を成長させ、その後、ビスシクロペンタジエニルマグネシウム(Cp_2Mg)をMg原料としてMgをドーピングしたp- $Al_{0.03}Ga_{0.97}N$ アクセプタ不純物ドーピング開始層409を厚さ5nmまで成長させる。

10 次に、10nm厚のp- $Al_{0.16}Ga_{0.84}N$ 電子オーバーフロー抑制層410を成長した後、速やかにキャリアガスを H_2 のみに切り替え、p- $Al_{0.10}Ga_{0.90}N$ (2nm厚)/p-GaN(2nm厚)-SLsクラッド層(120ペア)411、および50nm厚のp-GaNコンタクト層412を順次積層する。

15 次に、p- $Al_{0.03}Ga_{0.97}N$ アクセプタ不純物ドーピング開始層409、p- $Al_{0.16}Ga_{0.84}N$ 電子オーバーフロー抑制層410、p- $Al_{0.10}Ga_{0.90}N$ /p-GaN-SLsクラッド層411、およびp-GaNコンタクト層412を、ストライプ状に加工する。その後、ストライプ状に加工された積層構造の両脇を絶縁膜である SiO_2 層415で覆い、電流注入領域を形成する。
20 ストライプ幅は2~3 μm 程度である。

25 次に、 SiO_2 層415の開口部におけるp-GaNコンタクト層412の表面と SiO_2 層415の一部の上に、p電極413を形成する。この後、半導体の積層構造をエッチングすることによってn-GaN層402の一部を露出させた後、その露出表面上にn電極414を形成する。このようにする代わりに、n-GaN基

板の裏面にn電極を形成しても良い。

本実施形態では、p電極413とのコンタクト抵抗を低減するため、p-GaNコンタクト層411におけるMg濃度を $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ から $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の範囲内に調節している。

5 上記の製造方法によれば、ノンドープGaN中間層407を成長した後、ノンドープ $\text{Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ 中間層408を成長させている間に、いったんTMGの供給を停止している。そして、 N_2 と NH_3 を供給した状態で速やかに昇温し、かつ途中でキャリアガスを N_2 と H_2 の混合ガスに変更している。

10 しかし、TMGの供給を停止せず、TMGを供給したままノンドープGaN中間層407の結晶成長を続け、かつ、昇温しても良い。また、TMGおよびTMAを供給してノンドープ $\text{Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ 中間層408の結晶成長を行ないながら昇温しても良い。このように、結晶中に非発光再結合中心の原因となるような欠陥が生成されない方法であれば、どのような昇温方法を採用しても良い。

15 次に、p- $\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ 電子オーバーフロー抑制層410のMg濃度分布に与えるノンドープ $\text{Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ 中間層408およびp- $\text{Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ -アクセプタ不純物ドーピング開始層409の役割について説明する。

20 図5(a)は、図3(a)および(b)に示す半導体レーザにおけるSIMSプロファイルを示すグラフであり、図5(b)は、p- $\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ 電子オーバーフロー抑制層410を成長させる前にノンドープ $\text{Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ 中間層408と、p- $\text{Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ -アクセプタ不純物ドーピング開始層409とを
25 形成した本実施形態の半導体レーザにおけるSIMSプロファイルを示すグラフである。なお、グラフにおいて、「1.0E+M」は

「 1.0×10^M 」を意味する。

図5 (a) および (b) のいずれのサンプルにおいても、p型のクラッド層 ($p\text{-Al}_{0.10}\text{Ga}_{0.90}\text{N}$ / $p\text{-Ga}\text{N}$ -SLs クラッド層 411 及び $p\text{-Al}_{0.14}\text{Ga}_{0.86}\text{N}$ / $p\text{-Ga}\text{N}$ -SLs クラッド層 310) のホール濃度が $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ となるように Mg ドーピングを行っている。具体的には、p型クラッド層における Mg 濃度が $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ となる条件で、Mg のドーピングを実行している。

p型アクセプタ不純物ドーピング開始層 409 の膜厚は 5 nm、電子オーバーフロー抑制層 410 の膜厚は 10 nm で統一している。本実施形態の半導体レーザでは、図5 (b) に示される Mg の濃度プロファイルから明らかなように、AlGa_N電子オーバーフロー抑制層 410 の Mg 濃度が既に $9.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ に達し、クラッド層 411 における Mg 濃度の目標値 ($1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) に略等しい値を実現している。これに対し、図5 (a) の例では、Mg ドーピングのメモリー効果に起因したドーピング遅れの影響が顕著に現れている。すなわち、AlGa_N電子オーバーフロー抑制層 309 中で Mg 濃度が深さ方向に変化しており、その大きさも $5 \sim 7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 程度しかない。

以上のように、Al を含んだノンドープ $\text{Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ 中間層 408 と $p\text{-Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ -アクセプタ不純物ドーピング開始層 409 とを成長させた後に、 $p\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ 電子オーバーフロー抑制層 410 を成長させることにより、メモリー効果による Mg のドーピング遅れを抑制することが可能となる。その結果、レーザ構造中で最もバンドギャップエネルギーが大きい $p\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ 電子オーバーフロー抑制層 410 における

Mg濃度を、クラッド層401におけるMg濃度とほぼ等しくすることができる。

本実施形態の効果を得るには、Mgドーピングを開始した後、オーバーフロー抑制層410（第2p型窒化物半導体層）の成長開始前に成長させる「Alを含んだ窒化物半導体層（第1p型窒化物半導体層）」の厚さを1nm以上50nm以下にすることが好ましい。このAlを含んだ窒化物半導体層（第1p型窒化物半導体層）におけるAl濃度は十分に高いことが好ましいため、第1p型窒化物半導体層のAl濃度は、 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $2 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 以下であり、かつ、第1p型窒化物半導体層においてAl濃度が $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $2 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 以下の領域の厚さが1nm以上であることが好ましい。

また、第1p型窒化物半導体層の成長前に行なうAlを含むノンドープ窒化物半導体層（Al_{0.03}Ga_{0.97}N中間層408）には、最終的には第1p型窒化物半導体層からMgが拡散する結果、p型化する領域が含まれる可能性がある。しかし、簡単のため、本明細書では、成長時点で意図的にp型不純物をドーピングしない限り、Al_{0.03}Ga_{0.97}N中間層408を「Alを含むノンドープ窒化物半導体層」と称することとする。

本実施形態によって得られる効果は、GaのかわりにInを含んだp-Al_{0.90}In_{0.10}Nアクセプタ不純物ドーピング開始層を用いても得ることができる。この場合、レーザ構造中でバンドギャップエネルギーが最も大きいp-Al_{0.16}Ga_{0.84}N電子オーバーフロー抑制層410に対して、それよりもバンドギャップエネルギーが小さく（ただしGa_{0.90}In_{0.10}N/Ga_{0.98}In_{0.02}N-MQW活性層405よりはバンドギャップエネルギーが大きい）、そ

して少なくともA1が含まれるノンドープの中間層と少なくともA1が含まれるアクセプタ不純物ドーピング開始層の3層構造が形成されていることが重要である。このA1が含まれることの必要性については後述する。

5 なお、特開2002-009004号公報に記載されている半導体レーザでは、AlGa_N層からのMgの拡散を防止するためにMgドーブp-Al_YGa_{1-Y}N層とSiドーブn-GaN層の間にノンドープAl_XGa_{1-X}N層（0 ≤ X ≤ Y ≤ 1）を挿入している。この構成では、ノンドープAl_XGa_{1-X}N層を挿入することにより、Mgドーブp-Al_YGa_{1-Y}N層から活性層（Siドーブn-GaN層）へのMgの拡散を抑制している。Mg拡散を抑制する
10 目的は、ドナー・アクセプターペア発光を抑え、バンド端発光を支配的にすることにある。

上記の半導体レーザでは、レーザ構造中で最もバンドギャップエネルギーの大きいMgドーブp-Al_YGa_{1-Y}N層に対してノンドープAl_XGa_{1-X}N層を用いた2層構造を形成しているため、Mg不純物の拡散は抑制可能である。しかし、レーザ構造中で最もバンドギャップエネルギーの大きいMgドーブp-Al_YGa_{1-Y}N層にメモリー効果によるMgドーピング遅れが発生してしまう。

20 なお、本願発明者らの検討によると、Alを含んだMgドーブp-AlGa_N層からの活性層へのMg拡散は、Alを含まないMgドーブp-GaN層と比較して非常に起こりにくいことがわかっている。この点の詳細は、後述する。

本来、GaNのバンドギャップエネルギーよりもAlを含有したAlGa_Nのバンドギャップエネルギーの方が大きいため、AlGa_Nにおけるアクセプタ不純物の活性化エネルギーは相対的に大きくなる。
25

したがって、AlGaInNの成長中にMgのドーピングを開始すると、p型不純物が不活性化しやすく、再現性、均一性の低下につながるため、望ましいことではない。

また、AlGaInNとGaInNとの間の格子定数差よりも、AlGaInNとGaInNとの間の格子定数差が大きくなるため、AlGaInN層を活性層の近傍に配置すると、活性層を構成する井戸層の歪の不均一を招きやすい。この歪が大きくなると、発光特性に悪影響を与え、均一性や信頼性にとって望ましいことではない。

しかしながら、本発明者らの検討の結果によると、GaInNにAlを敢えて含有させることにより、Mgドーピングのメモリー効果の低減に成功し、急峻性の高いドーピング界面を実現することができ、レーザの発光特性を著しく改善することができる。

なお、井戸層に生じ得る格子歪を低減するためには、ノンドープのGaInN中間層の厚さを、歪低減に最適な大きさに設定することが好ましい。

次に、ドーピング開始層におけるAlの役割を説明する。

Mg原料は結晶成長装置の配管やリアクター内壁に非常に付着しやすく、ドーピングが開始された直後の初期は、原料のほとんどがこの反応に消費される。これがメモリー効果の生じる主な原因である。メモリー効果の影響は結晶成長装置にも依存するが、本実施形態で使用している結晶成長装置でGaInN成長中に $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ のMg濃度を得るためにMgドーピングを開始した場合、Mgのドーピングフロントは結晶表面側に約10nmシフトする。このため、Mg濃度が $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の90%のレベル($9 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)に達するのは、GaInNの成長開始後に厚さ200nm程度の結晶成長が進行したときになる。

一方、Al組成1%のAlGa_{0.97}N成長中に同様のMgドーピングを行った場合、Mgのドーピングフロントの遅れはなく、 $9 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のMg濃度に到達するまで10nmを要するだけであった。これは、MgとAlの反応性が非常に高いために、Alが含有された原料ガス中にMgを添加すると、AlとMgが即座に反応し、配管やリアクター内壁に付着することなく複合体を形成して、結晶中に取り込まれるからである。

次に、図6を参照する。図6は、p-AlGa_{0.97}N-アクセプタ不純物ドーピング開始層のAl組成に対するp-AlGa_{0.97}N電流オーバーフロー抑制層のMg濃度を示すグラフである。図6に示すように、p-AlGa_{0.97}N-アクセプタ不純物ドーピング開始層におけるAl濃度は、Mgのドーピング濃度の10倍以上の大きさに設定することが好ましい。具体的には、必要なMg濃度が $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ であれば、Al濃度は $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 、結晶中のAl組成で0.1%以上に設定することが好ましい。p-AlGa_{0.97}N-アクセプタ不純物ドーピング開始層におけるAl濃度を、Mgのドーピング濃度の100倍以上の大きさに設定すると、更にMg濃度が増加するため、より好ましい。

以上のように、効率よくAlとMgの複合体を形成してMgドーピングを行うことにより、Mgのメモリー効果を抑制できる。その結果、急峻なドーピング界面を持った、ドーピング遅れのないMgドーピングプロファイルを実現できる。

なお、図3に示す半導体レーザにおけるGa_{0.97}N中間層307、およびp-Ga_{0.97}Nアクセプタ不純物ドーピング開始層308のかわりに、ノンドープAl_{0.03}Ga_{0.97}N中間層408およびp-Al_{0.03}Ga_{0.97}Nアクセプタ不純物ドーピング開始層409を用い

ることにより、電子オーバーフロー抑制層を形成したときの圧縮応力を小さくすることができる。

圧縮応力は、ピエゾ電界を発生させ、それに起因して起こるバンド構造の変化は、アクセプタ不純物を拡散させ、不均一な濃度分布を形成する。しかし、本実施形態では、圧縮応力を小さくできるAlを含んだ中間層／アクセプタ不純物ドーピング開始層の組み合わせを用いることにより、効果的に急峻性の優れたMgドーピングプロファイルを実現できる。

GaN結晶中のMgが形成するアクセプタ準位は、ドナー不純物であるSiよりも活性化エネルギーが大きい。このため、電流注入によりレーザ発振させた場合に光学的損失（光吸収損失）を発生させやすい。しかし、本発明では、高い制御性、高い急峻性で、界面における所望のドーピングプロファイルを形成できるため、光吸収損失が極めて低いレーザ素子を歩留まり良く提供できるようになる。

なお、p-GaN層でMgドーピングを開始し、急峻なドーピングプロファイルを実現する方法としては、ドーピング界面のみにMg供給量を過剰にし、ドーピング遅れを抑制する方法も考えられる。しかし、配管やリアクター内壁への付着は低減できず、やはりメモリー効果によりドーピング遅れが発生し、AlGaN電子オーバーフロー抑制層中では逆にアクセプタ不純物であるMgが過剰に取り込まれ（例えばMg濃度にして $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以上）、アクセプタが補償され高抵抗化してしまうなど制御性に乏しい。

また、メモリー効果が発生しにくい配管、リアクター構造に結晶成長装置を改造することもできるが、そのためには、コストや、必要な時間等が莫大なものとなる。

これらに対し、本発明によれば、特別な装置の改造や手法を用い

ることなく、容易にMgドーピングの制御性を向上できる。

本発明の効果を得るには、AlとMgの複合体を効率良く形成しながらMgドーピングを行うことが重要である。Mgドーピングを行なうとき、キャリアガスとしてH₂だけでなくN₂が含まれていると、反応性が高まるため、より望ましい。また、この反応性を高めるためには、レーザ構造の電気特性に影響を与えない範囲で酸素、炭素、シリコン等の不純物を微量添加することも有効である。

従来のp-GaNアクセプタ不純物ドーピング開始層を用いた場合には、レーザ動作時の電流印加や、レーザに加えられた熱、磁界により、Mgが容易に活性層側へ拡散する。その結果、活性層近傍で光吸収損失を引き起こし、レーザの信頼性に悪影響を及ぼすという問題が生じる。これに対し、p-AlGaNアクセプタ不純物ドーピング開始層を用いてレーザ構造を作製した場合は、結晶中でもAlとMgの結合が強く、レーザ動作中のMgの拡散が生じにくい。

更に、従来のp-GaNアクセプタ不純物ドーピング開始層を用いた場合には、結晶成長装置の配管やリアクター内壁に付着したMgが、結晶成長後も残留し、引き続いてレーザ構造を作製する場合にn型層に徐々に混入し、n型ドナー不純物を補償し高抵抗化してしまう。これに対し、p-AlGaNアクセプタ不純物ドーピング開始層を用いてレーザ構造を作製した場合、この影響を抑制できる。

本実施形態ではGaN基板を用いているが、基板はGaNに限られず、AlGaN、InGaN、またはAlGaInN等の窒化物半導体バルク基板、サファイア基板、炭化珪素基板、シリコン基板、表面にGaNが成長したガリウム砒素基板、選択横方向成長を用いて作製されたELO-GaN基板でも良い。

本実施形態では、n型のクラッド層にバルク結晶のAlGaN、

p型のクラッド層にAlGaInとGaInから構成される超格子構造を用いているが、p型のクラッド層にバルク結晶のAlGaIn、n型のクラッド層にAlGaInとGaInから構成される超格子構造を用いても良い。また、n型、p型の両方にバルク結晶のAlGaIn、
5 またはAlGaInとGaInから構成される超格子構造を用いてもよい。更に、これらの半導体層は、Inやホウ素(B)砒素(As)、リン(P)を含有していてもよく、光とキャリアの閉じ込めが効果的に実現できる構成であれば良い。

また、本実施形態では、Gaの原料としてTMG、Alの原料としてTMA、Inの原料としてTMI、Mgの原料としてCp₂Mg、Nの原料としてNH₃を用いているが、原料ガスは、これらに限定されない。Gaの原料としてトリエチルガリウム(TEG)や塩化ガリウム(GaCl₃)、Alの原料としてトリエチルアルミニウム(TEA)やジメチルアルミハイドライド(DMAH)、
10 ジメチルアルミクロライド(DMACl)、トリメチルアミンアラン(TMAA)、Inの原料としてトリエチルインジウム(TEI)、Mgの原料としてビスエチルシクロペンタジエニルマグネシウム(EtCp₂Mg)やビスメチルシクロペンタジエニルマグネシウム(MeCp₂Mg)、Nの原料としてヒドラジン(N₂H₄)やモノメチルヒドラジン(MMH)、ジメチルヒドラジン(DMH)を用いても良い。特に、本発明を効果的に実現するためには、AlとMgの複合体が効率よく形成され、それを用いてMgドーピングを行うことが重要であり、この複合体の形成では分子量
15 20 25 だけ分子量の大きい原料を用いることがさらに望ましい。

(実施形態2)

本実施形態では、実施形態1と同様に半導体積層構造を形成した後、ドライエッチングプロセスにより、この積層構造をストライプ状に加工する。このとき、ノンドープ $\text{Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ 中間層408が露出する寸前まで、表面側から p-GaN コンタクト層412、 $\text{p-Al}_{0.10}\text{Ga}_{0.90}\text{N}$ / p-GaN-SLs クラッド層411、 $\text{p-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ 電子オーバーフロー抑制層410、 $\text{p-Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ アクセプタ不純物ドーピング開始層409を順にエッチングする。エッチング深さはレーザのキンクレベルやビーム形状を決定する重要なパラメータであり、精密な制御することが望ましい。

レーザ構造エピウェハーの数箇所に $50\mu\text{m}$ 角の光学評価用モニター窓を設置しておき、ドライエッチングプロセスを進めながら、その場観測で光学的評価を行い、ドライエッチングを施した。

本実施形態では光学的評価手法としてフォトルミネッセンス測定を行った。フォトルミネッセンスの評価には波長 325nm のヘリウム-カドミウムレーザを用いた。 p 型アクセプタ不純物がドーピングされた化合物半導体では p 型アクセプタ不純物準位が形成されており、ドナー・アクセプターペア発光が観測され、 p 型アクセプタ不純物がドーピングされていない化合物半導体では主にバンド端近傍からの発光が観測される。 $\text{p-Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ アクセプタ不純物ドーピング開始層409を用いない従来技術では、 p 型アクセプタのドーピングプロファイルが裾を引いており、ドーピング界面が明確でないため光学的評価からドーピング界面を求めることは不可能であった。

しかしながら、実施形態1のように $p\text{-Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ アクセプタ不純物ドーピング開始層409を用いることにより、ドーピング界面の急峻性が向上でき、光学的評価により容易に膜厚制御が可能であった。もちろんこの制御方法はフォトルミネッセンス測定だけではなく、プラズマ発光分析等、評価が可能な手法であれば何を用いても良い。また、光学評価用モニター窓は、ウェハー内で素子の歩留まりが低下せず、また、光学評価が可能であれば形状、サイズは問わない。

また、エッチング終了後、この光学評価用モニター窓からフォトルミネッセンスの測定を行うことにより、活性層の発光波長を評価することができ、レーザプロセスの前段階で、レーザ構造の出来栄評価を行うこともでき素子プロセスの効率化が達成できた。

(実施形態3)

実施形態1とp型クラッド層の構造を除いて同様な構成でレーザ構造を結晶成長した。実施形態1では $p\text{-Al}_{0.10}\text{Ga}_{0.90}\text{N}/p\text{-Ga}\text{N-SLs}$ クラッド層411を用いていたが、ここではそのかわりに $p\text{-Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{N}/p\text{-Al}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{N-SLs}$ クラッド層601を用いている。図7(a)は、このレーザ構造の構造図を示す。

$p\text{-Al}_{0.10}\text{Ga}_{0.90}\text{N}/p\text{-Ga}\text{N-SLs}$ クラッド層411を用いた場合、周期的にTMAの供給/非供給を繰り返してAlGa_{0.90}N層とGa_{0.90}N層を形成していく。このとき、一様にMgドーピングを行っていると、Ga_{0.90}N層形成中にはメモリー効果によってMgの取り込み量が減少する。逆にAlGa_{0.90}N層を形成する場合には、界面付近で急激にMgの取り込み量が増大する。このため、定常値

で安定するという変化を繰り返し、図7（b）に示すように、Mg濃度がクラッド層内で安定せず、増減を繰り返すため、レーザ構造の低電圧動作に対する再現性が低下してしまうことになる。

一方、 $p\text{-Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{N}/p\text{-Al}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{N}$ -SLsクラッド層601を用いた場合、常にTMAが供給されておりメモリー効果の影響が低減できる。このため、図7（c）に示すようにクラッド層内のMg濃度は再現性良く一定値に制御することが可能となり、高い制御性で動作電圧低減が実現できる。

（実施形態4）

以下、図8（a）および（b）を参照しながら、本発明による窒化物半導体素子の第4の実施形態を説明する。本実施形態の半導体レーザは、次に説明する部分を除いて、図4（a）に示す半導体レーザ（実施形態1）の構成と同様の構成を有している。すなわち、実施形態1における40nm厚のノンドープ $\text{Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ 中間層408、および5nm厚の $p\text{-Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ -アクセプタ不純物ドーピング開始層409に代えて、40nm厚のノンドープ $\text{Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.95}\text{In}_{0.02}\text{N}$ 中間層701、および5nm厚の $p\text{-Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.95}\text{In}_{0.02}\text{N}$ -アクセプタ不純物ドーピング開始層702を有している。

これらの層におけるAl組成は、本実施形態と実施形態1との間で等しくしているため、Mgのドーピングプロファイルに差異はないが、Inを含有している分だけバンドギャップエネルギーは小さくなる。その結果、これらの層における不純物の活性化エネルギーが小さくなり、ホール濃度は高くなっている。また、活性層に加わる歪も小さくなっている。このため、本実施形態によれば、より一層の

しきい値電流の低減と信頼性の向上が実現できる。

（実施形態 5）

以下、図 9（a）および（b）を参照しながら、本発明による窒化物半導体素子の第 5 の実施形態を説明する。本実施形態の半導体
5 レーザは、次に説明する部分を除いて、図 4（a）に示す半導体レーザ（実施形態 1）の構成と同様の構成を有している。すなわち、本実施形態では、実施形態 1 における 5 nm 厚の $p\text{-Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ アクセプタ不純物ドーピング開始層 409 に代えて、
10 5 nm 厚の $p\text{-Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.95}\text{In}_{0.02}\text{N}$ アクセプタ不純物ドーピング開始層 801、および 5 nm 厚の $p\text{-Ga}_{0.98}\text{In}_{0.02}\text{N}$ 層 802 を有している。

Mg ドーピング開始層 801 の Al 組成は両実施形態で等しく、Mg のドーピングプロファイルに差異はないが、本実施形態の方が
15 $p\text{-Ga}_{0.98}\text{In}_{0.02}\text{N}$ 層 802 を挿入している分だけ MQW 活性層 405 と $p\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ 電子オーバーフロー抑制層 410 の間の距離が長い。しかしながら、5 nm 厚の $p\text{-Ga}_{0.98}\text{In}_{0.02}\text{N}$ 層 802 は、In を含有しているため、そのバンドギャップエネルギーが GaN のバンドギャップエネルギーよりも小さく、
20 結果的に非常に高いホール濃度を有する。このため、活性層 405 へのホールの注入効率が向上し、より一層のしきい値電流の低減と信頼性の向上が実現できる。

（実施形態 6）

以下、図 10（a）および（b）を参照しながら、本発明による窒化物半導体素子の第 6 の実施形態を説明する。本実施形態の半導
25

体レーザは、次に説明する部分を除いて、図4(a)に示す半導体レーザ（実施形態1）の構成と同様の構成を有している。すなわち、本実施形態では、図4(a)の半導体レーザにおける40nm厚のノンドープ $\text{Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ 中間層408、および5nm厚のp- $\text{Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ アクセプタ不純物ドーピング開始層409に代えて、40nm厚のノンドープ $\text{Al}_{0.06}\text{Ga}_{0.84}\text{In}_{0.10}\text{N}$ 中間層901および3nm厚のp- $\text{Al}_{0.06}\text{Ga}_{0.84}\text{In}_{0.10}\text{N}$ アクセプタ不純物ドーピング開始層902を有している。

本実施形態では、中間層901およびアクセプタ不純物ドーピング開始層902のAl組成が、それぞれ、実施形態1における中間層408およびアクセプタ不純物ドーピング開始層409のAl組成よりも高い。そのため、Mgのドーピングプロファイルが、より急峻に立ち上がるので、p- $\text{Al}_{0.06}\text{Ga}_{0.84}\text{In}_{0.10}\text{N}$ アクセプタ不純物ドーピング開始層902を薄くすることができる。

また、本実施形態のp- $\text{Al}_{0.06}\text{Ga}_{0.84}\text{In}_{0.10}\text{N}$ アクセプタ不純物ドーピング開始層902はGaInと格子整合するため、活性層405に印加される歪を実施形態1よりも小さくできる。このため、より一層の高出力化と信頼性の向上が実現できる。

（実施形態7）

以下、図11(a)および(b)を参照しながら、本発明による窒化物半導体素子の第7の実施形態を説明する。本実施形態の半導体レーザは、次に説明する部分を除いて、図4(a)に示す半導体レーザ（実施形態1）の構成と同様の構成を有している。すなわち、本実施形態では、40nm厚のノンドープ $\text{Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ 中間層408、および5nm厚のp- $\text{Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ アクセ

プタ不純物ドーピング開始層409に代えて、40nm厚のノンド
ープ $\text{Al}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ 中間層1001、および1nmごとにA
l組成が0.03ずつ階段的に0.01から0.13まで上昇する
5nm厚の $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0.01 \leq x \leq 0.13$) アクセプ
5 タ不純物ドーピング開始層1002を有している。

本実施形態では、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0.01 \leq x \leq 0.13$)
アクセプタ不純物ドーピング開始層1002におけるAl組成を段
階的に増加させることにより、Mgのドーピングプロファイルを更
に急峻に立ち上げることが可能となる。

10 また、本実施形態では、格子定数差に起因した格子歪の発生を抑
制できるため、活性層に印加される応力の低減、バンド不連続によ
るノッチの発生の低減が実現できる。

さらに、圧縮応力によって生じるピエゾ電界効果の影響を効果的
に低減できるために、活性層へのホールの注入効率が高まり、より
15 一層のしきい値電流の低減と信頼性の向上、そして歩留まりの向上
が実現できる。

本実施形態では、1nmごとにAl組成が0.03ずつ階段的に
0.01から0.13まで上昇するように5nm厚の $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0.01 \leq x \leq 0.13$) アクセプタ不純物ドーピング開始
20 層1002を形成しているが、このことによる効果は、Al組成を階
段的に増加させた場合にのみ得られるものではない。図11(b)
の一部に拡大して示すように、Al組成を連続的に増加させること
や、放物線的に増加させることによっても、格子定数差に起因した
歪の発生を大幅に低減でき、バンド不連続によるノッチの発生は完
25 全に抑えられる。

以上説明してきたように、本発明の窒化物半導体素子によれば、

第2 p 型窒化物半導体層によるキャリア閉じ込め効率を向上させることができるため、クラッド層として機能する第3 p 型窒化物半導体層によるキャリアの閉じ込めを重視する必要がなくなる。このため、クラッド層（第3 p 型窒化物半導体層）のバンドギャップを小さくすることが許容され、その結果、クラッド層におけるA 1 組成化を低減することが可能になる。以下に説明する実施形態では、上述の各実施形態に比べてクラッド層（第3 p 型窒化物半導体層）A 1 組成化を低減することにより、そのバンドギャップを第1 p 型窒化物半導体層のバンドギャップよりも小さく設定している。クラッド層として機能する第3 p 型窒化物半導体層におけるA 1 組成化の低減は、窒化物半導体素子の直列抵抗 R_s を低下させるため、消費電力を低減できる。

（実施形態8）

以下、図12を参照しながら、本発明による窒化物半導体素子の第8の実施形態を説明する。

まず、 $n\text{-Ga}\text{N}$ 基板1601を用意し、その表面を有機溶剤及び酸によって清浄化した後、成長炉内のサセプタ上に基板1601を設置する。 N_2 ガスにて成長炉内を十分に置換した後、 $1^\circ\text{C}/\text{秒}$ の昇温レートで 1000°C まで昇温し、キャリアガスを H_2 に切り替えると共にアンモニア（ NH_3 ）の供給を開始して基板表面のクリーニングを行なう。このクリーニングの時間は1分以上行なうことが望ましい。その後、トリメチルガリウム（TMG）とモノシラン（ SiH_4 ）の供給を開始し、 $2\mu\text{m}$ 厚の $n\text{-Ga}\text{N}$ 層1602の成長を行い、引き続いてトリメチルアルミニウム（TMA）を加え、 $1.5\mu\text{m}$ 厚の $n\text{-Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ クラッド層1603

の成長を行う。次に、TMAの供給を停止してn-GaN光ガイド層1604を0.1 μ m成長した後、キャリアガスをN₂に変えNH₃の供給を停止し、成長温度を780℃まで降温する。

次に、NH₃、TMG及びトリメチルインジウム(TMI)を供給することにより、光ガイド層1604上に厚さが約3nmのIn_{0.1}Ga_{0.9}N井戸層と、井戸層の上に厚さが約7nmのIn_{0.02}Ga_{0.98}N障壁層とを1周期とする3周期分の半導体層を成長させることにより多重量子井戸(MQW)活性層1605を形成する。

引き続き30nm厚のノンドープIn_{0.02}Ga_{0.98}N中間層1606を成長させ、30nm厚のノンドープGaN中間層1607を成長した後、TMGの供給を停止する。N₂とNH₃を供給した状態で速やかに1000℃まで昇温し、キャリアガスをN₂とH₂の混合ガスに切り替える。TMG及びTMAの供給を再開し、45nm厚のp-Al_{0.10}Ga_{0.90}N中間層(ドーピングエンハンス層)1608を成長させる。

このドーピングエンハンス層1608の成長開始時、または成長途中において、ビスシクロペンタジエニルマグネシウム(Cp₂Mg)によるMgドーピングを開始する。

ドーピングエンハンス層1608の成長開始後、その成長途中において、Mgドーピングを開始した場合、ドーピングエンハンス層1608には、MgがドーピングされていないAl_{0.10}Ga_{0.90}N下層部分と、MgがドーピングされたAl_{0.10}Ga_{0.90}N上層部分とが形成されることになる。言い換えると、ドーピングエンハンス層1608は、ノンドープAl_{0.10}Ga_{0.90}N下層部分と、MgドーピングAl_{0.10}Ga_{0.90}N上層部分の両方を含む構造を有することになる。この場合、ノンドープAl_{0.10}Ga_{0.90}N下層部分は、実

施形態1における $\text{Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ 中間層408に対応し、 Mg ドーパ $\text{Al}_{0.10}\text{Ga}_{0.90}\text{N}$ 上層部分は、実施形態1における $\text{p-Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ アクセプタ不純物ドーピング開始層409に相当する。

5 なお、ドーピングエンハンス層1608の成長開始時と同時に Mg ドーピングを開始した場合でも、ドーピング遅れにより、 $\text{p-Al}_{0.10}\text{Ga}_{0.90}\text{N}$ 下層部分が形成される。

10 このようにして、ドーピングエンハンス層1608の一部には、 Mg がドーパされていない領域が形成され得るが、しかし、その後の工程で生じる Mg の熱拡散により、ドーピングエンハンス層1608の全体にも Mg がドーパされ得る。

 なお、ドーピングエンハンス層1608のうち、 Mg がドーパされた部分が本発明の第1 p 型窒化物半導体層として機能する。

15 ドーピングエンハンス層1608を形成した後、10nm厚の $\text{p-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ 電子オーバーフロー抑制層1609を成長させる。この $\text{p-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ 電子オーバーフロー抑制層1609が本発明の第2 p 型窒化物半導体層として機能する。

20 $\text{p-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ 電子オーバーフロー抑制層1609を成長させた後、速やかにキャリアガスを H_2 に切り替え、 $\text{p-Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ クラッド層1610を成長した後、50nm厚の p-GaN コンタクト層11611を順次積層する。

25 本実施形態においては、 p 型ドーパントとしてマグネシウム(Mg)を用いたが、 Mg に加えて、炭素(C)、亜鉛(Zn)、ベリリウム(Be)、カドミウム(Cd)等の p 型ドーパントを添加してもよい。

 なお、窒化物半導体の成長方法はMOVPE法に限定されず、ハ

イドライド気相成長法（HVPE法）や分子線エピタキシー法（MBE法）など、化合物半導体結晶を成長させるためにこれまで提案されている全ての方法を採用することができる。

本実施形態では、Gaの原料としてTMG、Alの原料としてTMAを用い、Inの原料としてTMI、Mgの原料としてCp₂Mg、Nの原料としてNH₃を用いているが、上記条件の原理を生かす結晶成長であれば、原料ガスは、これらに限定されない。Gaの原料として、トリエチルガリウム（TEG）や塩化ガリウム（GaCl₃）を、Alの原料として、トリエチルアルミニウム（TEA）やジメチルアルミハイドライド（DMAH）、ジメチルアルミクロライド（DMACl）を、Inの原料として、トリエチルインジウム（TEI）、Mgの原料として、ビスエチルシクロペンタジエニルマグネシウム（EtCp₂Mg）やビスメチルシクロペンタジエニルマグネシウム（MeCp₂Mg）、Nの原料として、ヒドラジン（N₂H₄）やモノメチルヒドラジン（MMH）ジメチルヒドラジン（DMH）を用いても良い。

本実施形態では、各クラッド層及びコンタクト層等にバルク結晶を用いたが、超格子構造を適用しても良い。

次に、共振器形成領域となる部分をp-Al_{0.10}Ga_{0.90}N中間層（ドーピングエンハンス層）1608に至るまでエッチングにより掘り込むことにより、ストライプ状に加工し、共振器形成領域の上部にリッジ部を形成する。リッジ部におけるストライプ幅は2～3μm程度である。エピタキシャル層におけるストライプ状の共振器形成領域をマスクして、該エピタキシャル層に対してn型コンタクト層1602の一部が露出するまでエッチングを行なう。

続いて、p型コンタクト層の上面の電極とのコンタクト部分及び

n型コンタクト層の上面の電極とのコンタクト部をそれぞれマスクし、CVD法等により、リッジ部の両脇に酸化シリコン(SiO_2)からなる保護絶縁膜1613を堆積し、電流注入領域を形成する。絶縁膜の開口部のp-GaNコンタクト層1611表面にはp電極1612を、n-GaNコンタクト層1602表面にはn電極1614を形成する。p-GaNコンタクト層1611のMg濃度は、p電極1612とのコンタクト抵抗低減のため、 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ から $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ に設定される。このようにして、図12に示される窒化物半導体レーザを作製できる。

なお、本実施形態においては、n側の電極を上面(p側電極と同じ側)に形成したが、n-GaN基板の裏面にn電極を形成し、上下から導通を取る構造としても良い。

このようにして得られた半導体レーザに対して、p側電極1612とn側電極1614との間に電圧を印加すると、MQW活性層1605に向かってp側電極1612から正孔が注入されると共にn側電極1614から電子が注入される。これにより、MQW活性層1605において、正孔と電子との再結合により光学利得を生じて約410nmの波長でレーザ発振を起こす。

以下、p-Al_{0.10}Ga_{0.90}N中間層(ドーピングエンハンス層)1608のAl組成比(バンドギャップ)が、p-Al_{0.16}Ga_{0.84}Nオーバーフロー抑制層1609よりも小さく、p-Al_{0.03}Ga_{0.97}Nクラッド層1610よりも大きい構造をとることの有効性について説明する。

図13は、本実施形態における活性層近傍の構成を示す図である。活性層側から、膜厚およびAl組成比(バンドギャップ)の異なる3領域以上の層から形成される。

本実施形態では、 p -AlGaNDーピングエンハンス層1102のうちのMgがドーピングされている部分が、第1 p 型窒化物半導体層に対応する。そして、 p -AlGaNOーバーフロー抑制層1103は第2 p 型窒化物半導体層に対応し、 p -AlGaNCラッド層1104は第3 p 型窒化物半導体層に対応する。第1 p 型窒化物半導体層のAl組成比を第3 p 型窒化物半導体層の組成比よりも高く設定し、かつ第2 p 型窒化物半導体層のAl組成比を第3 p 型窒化物半導体層より高く構成する。この結果、バンドギャップについては、第2 p 型窒化物半導体層>第1 p 型窒化物半導体層>第3 p 型窒化物半導体層の関係が満足される。

第1 p 型窒化物半導体層におけるAl組成比は、そのバンドギャップが第2 p 型窒化物半導体層よりも小さくなる範囲内で、できるだけ高いAl組成比を用いることが望ましい。この第1 p 型窒化物半導体層の存在により、 p 型不純物のドーピング遅れを解消することができ、第2 p 型窒化物半導体層に対して十分な不純物濃度を確保することが可能となる。

望ましいAl組成比は第1 p 型窒化物半導体層が5~20%、第2 p 型窒化物半導体層が10~30%、第3 p 型窒化物半導体層が平均3~9%であり、最も望ましいAl組成比は第1 p 型窒化物半導体層が6~12%、第2 p 型窒化物半導体層が15~20%、第3 p 型窒化物半導体層が平均3.5~5.5%である。第1 p 型窒化物半導体層や第2 p 型窒化物半導体層といった高Al組成比の層を厚く構成した場合、直列抵抗の増加を導くため、第3 p 型窒化物半導体層よりも膜厚を薄くすることが必要である。よって、各層の望ましい膜厚は第1 p 型窒化物半導体層で1~50nm、第2 p 型窒化物半導体層で5~20nmである。最も望ましい膜厚は第1 p 型

窒化物半導体層で5～20nm、第2p型窒化物半導体層で5～10nmである。

5 なお、第1p型窒化物半導体層のAl組成比は、上記した望ましいAl組成比の範囲内であれば傾斜を持っていたても良い。また、この傾斜は連続的でも、階段的でも良い。

また、各領域は、上記した望ましいAl組成比および膜厚の範囲内であれば、バルク層ではなく超格子層でもよい。また、バルク層と超格子層が混在していてもよい。

10 本実施形態によれば、AlGaInオーバーフロー抑制層1103において $9 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上の高いMg濃度を実現できることを実験的に確認した。

15 本実施形態では、ドーピングの開始を、ドーピングエンハンス層1102の成長最初時または成長途中に行うが、ドーピングエンハンス層1102の全部又は一部でMgのドーピングを行っていれば良く、ドーピングエンハンス層1102におけるMg濃度が均一である必要は無い。

20 オーバーフロー抑制層1103におけるp型不純物濃度は、最大 $8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ から $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の範囲内にあることが好ましく、また、不純物濃度の分布も厚さ方向に均一であることが好ましい。

25 このように、AlGaInドーピングエンハンス層1102の挿入により、Mgドーピング遅れの影響を抑制することが可能となるため、レーザ構造の中で最もバンドギャップエネルギーが大きいAlGaInオーバーフロー抑制層1103中のMg濃度をクラッド層のMg濃度とほぼ等しくすることができる。こうしてホール注入効率を改善することにより、しきい値電流を低減すると共に、pn界面位

置のズレによる動作電圧の上昇等を抑制することができる。特に、ドーピングエンハンス層 1102 を超格子層とすることにより、平均 Al 組成が同一でも Al 濃度の高い部分を形成でき、Mg 取り込まれの急峻性を向上させることができる。

5 なお、オーバーフロー抑制層 1103 を超格子層から構成することにより、Mg アクセプターの活性化エネルギーを低減することができるため、直列抵抗を低減することができる。この効果は、Ga のかわりに In を含んだ p-Al_{0.90}In_{0.10}N アクセプター不純物ドーピング開始層でもよく、ドーピングを開始する層に少なくとも Al が含まれていれば良い。

10 こうした構造上の工夫により、オーバーフロー抑制層に対して十分に p 型ドーパントをドーピングできれば、この層内でキャリアを十分ブロックすることができる。これにより、クラッド層においてキャリアの閉じ込めを考慮する必要性はほとんどなく、AlGa_{0.90}N クラッド層 1104 の Al 組成比を低減することが可能となる。また、光の閉じ込めに関しては、クラッド層の Al 組成比を低減してもクラッド層の厚みを厚くすることによってカバーできる。

15 以上により、p 型ドーパント濃度を構造上の工夫により制御することにより、キャリアの閉じ込めを向上させ、クラッド層の Al 組成比の低減化により低抵抗化が可能となる。これにより、デバイスの直列抵抗を低減でき、動作電圧を下げることも可能となる。

20 本実施形態では GaN 基板上のレーザ構造について説明したが、本発明の結晶成長は、上記条件の原理を生かす結晶成長であれば基板は GaN に限るものではなく、AlGa_{0.90}N、InGa_{0.10}N や AlGa_{0.90}In_{0.10}N 等の窒化物半導体バルク基板、サファイア基板や炭化珪素基板、シリコン基板、ガリウム砒素基板上に成長した GaN 等でも、

もちろん選択横方向成長を用いて作製したE L O—G a N基板でも良い。

また、本実施形態ではレーザ素子について説明したが、これに限るものではなく、発光ダイオード素子にも適用できる。また、p n
5 接合を有し、電子のオーバーフロー防止と低抵抗化とを同時に必要とする全ての素子に適用できる。更に、上記効果はB A l G a l n Nや砒素（A s）、リン（P）を含有した混晶化合物半導体全般に成り立つ。

10 （実施形態9）

図14を参照しながら、本発明による窒化物半導体素子の第9の実施形態を説明する。

まず、n—G a N基板1701の表面を有機溶剤及び酸によって清浄化した後、成長炉内のサセプター上に基板1701を設置する。
15 N₂ガスにて成長炉内を十分に置換した後、1℃/秒の昇温レートで1000℃まで昇温し、キャリアガスをH₂に切り替えると共にアンモニア（NH₃）の供給を開始して基板表面のクリーニングを行なう。このクリーニングの時間は1分以上行なうことが望ましい。その後、トリメチルガリウム（TMG）とモノシラン（SiH₄）
20 の供給を開始し、2μm厚のn—G a N層1702の成長、引き続いてトリメチルアルミニウム（TMA）を加え、1.5μm厚のn—A l_{0.05}G a_{0.95}Nクラッド層1703の成長を行う。TMAの供給を停止してn—G a N光ガイド層1704を0.1μm成長した後、キャリアガスをN₂に変えNH₃の供給を停止し、成長温度を780℃まで降温する。
25

次に、NH₃、TMG及びトリメチルインジウム（TMI）を供

給することにより、光ガイド層1704上に厚さが約3nmの $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 井戸層と、井戸層の上に厚さが約7nmの $\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{N}$ 障壁層とを1周期とする3周期分の半導体層を成長させることにより多重量子井戸(MQW)活性層1705を形成する。

5 引き続き30nm厚のノンドープ $\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{N}$ 中間層1706、30nm厚のノンドープGa_{0.98}N中間層1707を成長した後、TMGの供給を停止する。 N_2 と NH_3 を供給した状態で速やかに1000℃まで昇温し、キャリアガスを N_2 と H_2 の混合ガスに切り替える。TMG及びTMA、TMIの供給を再開し、45
10 nm厚のp- $\text{Al}_{0.10}\text{Ga}_{0.85}\text{In}_{0.05}\text{N}$ 中間層(ドーピングエンハンス層)1708を成長させる。この中間層の成長途中において、ビスシクロペンタジエニルマグネシウム(Cp_2Mg)によるMgドーピングを開始する。その後、10nm厚のp- $\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.75}\text{In}_{0.10}\text{N}$ オーバーフロー抑制層1709を成長させ
15 た後、速やかにキャリアガスを H_2 に切り替え、p- $\text{Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ クラッド層1710と、50nm厚のp-GaNコンタクト層1711とを順次積層する。

以上のようにして、半導体レーザを構成するエピタキシャル層を得ることができる。なお、これ以降の窒化物半導体レーザの製作工程は実施形態8と同様であるため、その説明を省略する。

20 なお、本実施形態においてはp型ドーパントとしてマグネシウム(Mg)を用いたが、代わりに炭素(C)、亜鉛(Zn)、ベリリウム(Be)、カドミウム(Cd)等を用いても良い。

また、本実施形態においては、窒化物半導体の成長方法としてMOVPE法を用いたが、これに限定するものではなく、ハイドライド気相成長法(HVPE法)や分子線エピタキシー法(MBE法)

など、化合物半導体結晶を成長させるためにこれまで提案されている全ての方法に適用できる。

また、本実施形態ではGaの原料としてTMG、Alの原料としてTMAを、Inの原料としてTMIを、Mgの原料としてCp₂Mg、Nの原料としてNH₃を用いたが、上記条件の原理を生かす結晶成長であればこれらに限るものではなく、Gaの原料としてトリエチルガリウム(TEG)や塩化ガリウム(GaClやGaCl₃)を、Alの原料としてトリエチルアルミニウム(TEA)、ジメチルアルミハイドライド(DMAH)、ジメチルアルミクロライド(DMACl)を、Inの原料としてトリエチルインジウム(TEI)、Mgの原料としてビスエチルシクロペンタジエニルマグネシウム(EtCp₂Mg)、ビスメチルシクロペンタジエニルマグネシウム(MeCp₂Mg)を、Nの原料としてヒドラジン(N₂H₄)、モノメチルヒドラジン(MMH)、ジメチルヒドラジン(DMH)を用いても良い。

また、本実施形態では、各クラッド層及びコンタクト層等にバルク結晶を用いたが超格子構造を適用しても良い。

次に、p-Al_{0.10}Ga_{0.85}In_{0.05}N中間層(ドーピングエンハンス層)1708のAl組成(バンドギャップ)が、p-Al_{0.16}Ga_{0.75}In_{0.10}Nオーバーフロー抑制層1709よりも小さく、p-Al_{0.03}Ga_{0.97}Nクラッド層1710よりも大きい構造をとり、p-Al_{0.16}Ga_{0.75}In_{0.10}Nオーバーフロー抑制層1709およびp-Al_{0.10}Ga_{0.85}In_{0.05}N中間層1708にIn組成を含むことの有効性について説明する。

本実施形態において用いた構造の特徴は、p-Al_{0.10}Ga_{0.85}In_{0.05}N中間層(ドーピングエンハンス層)1708という

比較的Al組成比が高い層をAlGaInN電子オーバーフロー抑制層の直前に挿入し、Mgのドーピングを $p\text{-Al}_{0.10}\text{Ga}_{0.85}\text{In}_{0.05}\text{N}$ 中間層の形成中から開始していることである。実施形態8で説明した通り、Alが含まれる混晶半導体層にはp型不純物（例えばMg等）が取り込まれやすく、ドーピング遅れが発生しにくいという大きな特徴を持つ。また、p型不純物の取り込み易さにはAl組成依存性があり、Al組成比が0%から50%の間においては、Al組成比の増加に伴いp型不純物を取り込まれる量は増加する。

本実施形態では、実施形態8と異なり活性層の近傍にInGaInNとの格子定数差が大きいAlGaInNをそのまま配置するのではなく、格子定数差をおさえるためにInを含んだAlGaInNを用いた。こうした構造をとることにより、高いAl組成比によりドーピング遅れを抑えつつ、格子定数差を低減することにより活性層を構成する井戸層の歪の不均一を出来る限り解消し、発光特性への影響を抑えられる。

図15は、本実施形態における活性層近傍の構成を示した図である。活性層側から、膜厚、Al組成比（バンドギャップ）およびIn組成比の異なる3領域以上の層から形成される。本実施形態では、 $p\text{-AlGaInN}$ ドーピングエンハンス層1803は第1p型窒化物半導体層に対応し、 $p\text{-AlGaInN}$ オーバーフロー抑制層1804は第2p型窒化物半導体層に対応し、 $p\text{-AlGaInN}$ クラッド層1805は第3p型窒化物半導体層に対応する。第1p型窒化物半導体層のAl組成比（バンドギャップ）は、第2p型窒化物半導体層よりも小さく、かつ、第3p型窒化物半導体層よりも大きくなるように構成する。第1p型窒化物半導体層におけるAl組成

比は、そのバンドギャップが第2 p型窒化物半導体層よりも小さくなる範囲内で、できるだけ高いA1組成を用いることが望ましい。これに加えて、第2 p型窒化物半導体層と前記第1 p型窒化物半導体層にIn組成を含むことにより、近傍に存在する活性層との格子定数差を抑えることが可能となる。この第1 p型窒化物半導体層の存在により、従来の構成では発生していたp型不純物のドーピング遅れを解消することができ、第2 p型窒化物半導体層に対して十分な不純物濃度を確保することが可能となる。

なお、望ましいA1組成比は、第1 p型窒化物半導体層が5～20%、第2 p型窒化物半導体層が10～30%、第3 p型窒化物半導体層が平均3～9%であり、最も望ましいA1組成比は、第1 p型窒化物半導体層が6～12%、第2 p型窒化物半導体層が15～20%、第3 p型窒化物半導体層が平均3.5～5.5%である。また、望ましいIn組成比は第1 p型窒化物半導体層が1～20%、第2 p型窒化物半導体層が1～30%である。このように、In組成比は少なくとも各層のA1組成よりも小さく設定することが望ましい。

本実施形態においては第1 p型窒化物半導体層におけるA1組成比と比べ、第2 p型窒化物半導体層におけるA1組成比を高く設定するため、In組成比に関しても第1 p型窒化物半導体層よりも第2 p型窒化物半導体層の方が大きくなるように設定する。これにより、各層の格子定数の差を小さくすることができ、活性層の歪をより低減できる。但し、第1 p型窒化物半導体層と活性層までの距離が比較的近い場合には、A1組成比の大きい第2 p型窒化物半導体層よりも第1 p型窒化物半導体層の格子定数が、活性層の歪に対してより大きく影響する場合もある。このような場合には、図16に

挙げたようにIn組成を第1p型窒化物半導体層(p-AlGaInNドーピングエンハンス層1903)よりも第2p型窒化物半導体層(p-AlGaInNオーバーフロー抑制層1904)の方が小さくなるように設定する方が好ましい。

5 また、第1p型窒化物半導体層や第2p型窒化物半導体層といった高Al組成比の層を厚くすると直列抵抗が増加するため、これらの層の膜厚は、第3p型窒化物半導体層よりも小さくすることが必要である。よって、各層の望ましい膜厚は、第1p型窒化物半導体層で1~50nm、第2p型窒化物半導体層で5~20nmであり、
10 さらに望ましい膜厚は、第1p型窒化物半導体層で5~20nm、第2p型窒化物半導体層で5~10nmである。

 なお、第1p型窒化物半導体層のAl組成比およびIn組成比は、上記した望ましいAl組成比およびIn組成の範囲内であれば傾斜を持っていても良い。また、この傾斜は連続的でも、階段的でも良い。
15 また、各領域は上記した望ましいAl組成比およびIn組成比、そして膜厚の範囲内であれば、バルク層ではなく超格子層であってもよく、バルク層と超格子層が混在していてもよい。

 本実施形態の構造をとることにより、AlGaInN電子オーバーフロー抑制層1804のp-AlGaInNドーピングエンハンス層との界面近傍においても、すでに $9 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上の高いMg濃度が実験的に確認できた。この値は実施形態8で挙げたMgの濃度と比べて同等レベルであり、In組成比により格子定数差を低減させた場合においても高いAl組成比を用いる限り、同様のドーピング効果が得られることが分かった。ドーピングの開始位置
20 25 に関しては、ドーピングエンハンス層1803の最初又は途中から行う必要がある。なお、ドーピングエンハンス層の全部又は一部で

不純物のドーピングを行っていれば良く、層内で不純物濃度が均一である必要は無い。オーバーフロー抑制層1804のドーピング濃度に関しては、最大 $8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ から $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ のp型不純物が均一にドーピングされていることが望ましい。

5 このように、AlGaInNドーピングエンハンス層1803の挿入によりMgドーピング遅れの影響を抑制することが可能となり、レーザ構造の中で最もバンドギャップエネルギーが大きいAlGaInN電子オーバーフロー抑制層804中のMg濃度をクラッド層のMg濃度とほぼ等しくすることができた。ホール注入効率を改善することにより、しきい値電流を低減できる。特に、ドーピングエン
10 ハンス層1803を超格子層とすることにより、平均Al組成比が同一でもAl濃度の高い部分を形成でき、Mg取り込まれの急峻性を向上させることができる。また、オーバーフロー抑制層1804を超格子層とすることによりMgアクセプターの活性化エネルギーを
15 低減することができ、直列抵抗を低減することができる。

 こうした構造上の工夫により、オーバーフロー抑制層1804に対して十分にp型ドーパントをドーピングできれば、この層内でキャリアを十分ブロックすることができる。これにより、クラッド層においてキャリアの閉じ込めを考慮する必要性はほとんどなく、AlGaInNクラッド層1805のAl組成比を低減することが可能となる。なお、クラッド層のAl組成比を低減しても、光の閉じ込め
20 に関しては、クラッド層の厚みを厚くすることによってカバーできる。以上のように、p型ドーパント濃度を構造上の工夫により制御することにより、キャリアの閉じ込めを向上させ、クラッド層のAl組成比の低減化により低抵抗化が可能となる。これにより、デバイスの直列抵抗を低減でき、動作電圧を下げる
25 ことが可能となる。

なお、本実施形態ではGaN基板上のレーザ構造について説明したが、本発明の結晶成長は、上記条件の原理を生かす結晶成長であれば基板はGaNに限るものではなく、AlGaN、InGaN、AlGaInN等の窒化物半導体バルク基板、サファイア基板や炭化珪素基板、シリコン基板、ガリウム砒素基板上に成長したGaN等でも、あるいは選択横方向成長を用いて作製したELO-GaN基板でも良い。

また、上述の実施形態における半導体素子は、いずれも、レーザ素子であるが、本発明は、これに限定されず、pn接合を有し、電子のオーバーフロー防止および低抵抗化を同時に必要とする全ての窒化物半導体素子に適用できる。例えば、発光ダイオード素子、受光素子、トランジスタなどの窒化物半導体素子に適用されえ得る。

前述した実施形態では、いずれも、p型アクセプタ不純物としてMgを用いているが、Mgに加えて炭素(C)、亜鉛(Zn)、ベリリウム(Be)、カドミウム(Cd)を添加しても良い。また、Mgドーピングを行なう窒化物半導体としては、AlGaInNや、As、Pを含有したAlGaInNAsP混晶化合物半導体であっても良い。

産業上の利用可能性

本発明によれば、活性層よりもバンドギャップエネルギーが大きく、電子オーバーフロー抑制層よりもバンドギャップエネルギーが小さいp型アクセプタ不純物ドーピング開始層を設けることにより、メモリー効果に起因したドーピング遅れのない急峻なアクセプタ不純物プロファイルを実現できる。これにより、高い信頼性を有した低しきい値電流、低動作電圧の化合物半導体受発光素子を、再現性、均

一性良く作製することが提供できる。

このような本発明による窒化物半導体素子は、主に光ディスク関連分野の光源として有用であり、また、レーザプリンタ、バーコードリーダ等にも応用できる。

請 求 の 範 囲

1. p型窒化物半導体層、n型窒化物半導体層、および、前記
p型窒化物半導体層と前記n型窒化物半導体層との間に挟まれてい
る活性層を備えた窒化物半導体素子であって、

前記p型窒化物半導体層は、

A l およびM gを含む第1 p型窒化物半導体層と、

M gを含む第2 p型窒化物半導体層とを有し、

前記第1 p型窒化物半導体層は、前記活性層と前記第2 p型窒化
物半導体層との間に位置しており、

前記第2 p型窒化物半導体層は、前記第1 p型窒化物半導体層の
バンドギャップよりも大きなバンドギャップを有している、窒化物
半導体素子。

2. 前記第2 p型窒化物半導体層は、前記活性層からのキャリ
アオーバーフローを抑制するバリア層として機能する請求項1に記
載の窒化物半導体素子。

3. 前記第1 p型窒化物半導体層のA l 濃度は、 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$
以上 $2 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 以下であり、

前記第1 p型窒化物半導体層においてA l 濃度が $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$
以上 $2 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 以下の領域の厚さは、1 nm以上である、
請求項1に記載の窒化物半導体素子。

4. 前記第1 p型窒化物半導体層と前記活性層との間に位置し、

A 1 を含むノンドープ窒化物半導体層を更に備えている請求項 1 に記載の窒化物半導体素子。

5 5. 前記ノンドープ窒化物半導体層は、前記第 2 p 型窒化物半導体層のバンドギャップよりも小さなバンドギャップを有している、請求項 4 に記載の窒化物半導体素子。

10 6. 前記ノンドープ窒化物半導体層は、前記第 1 p 型窒化物半導体層のバンドギャップに等しいバンドギャップを有している、請求項 5 に記載の窒化物半導体素子。

15 7. 前記ノンドープ窒化物半導体層および前記第 1 p 型窒化物半導体層の合計の厚さは、1 nm 以上 50 nm 以下である、請求項 4 から 6 の何れかに記載の窒化物半導体素子。

8. 前記第 2 p 型窒化物半導体層の厚さは、5 nm 以上 20 nm 以下である、請求項 7 に記載の窒化物半導体素子。

20 9. 前記第 2 p 型窒化物半導体層において Mg 濃度が $8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以下の領域の厚さは 1 nm 以下である、請求項 8 に記載の窒化物半導体素子。

25 10. 前記 p 型窒化物半導体層は、前記第 2 p 型窒化物半導体層のバンドギャップよりも小さなバンドギャップを有する第 3 p 型窒化物半導体層を更に有し、

前記第 3 p 型窒化物半導体層と前記第 1 p 型窒化物半導体層との

間に前記第2 p型窒化物半導体層が位置している、請求項1に記載の窒化物半導体素子。

1 1. 前記第3 p型窒化物半導体層のバンドキャップは前記第
5 1 p型窒化物半導体層のバンドキャップよりも小さい、請求項10
に記載の窒化物半導体素子。

1 2. 前記第3 p型窒化物半導体層はクラッド層として機能する
請求項10に記載の窒化物半導体素子。

10 1 3. 前記第1 p型窒化物半導体層および第2 p型窒化物半導
体層の少なくとも一方はInを含む請求項10から12の何れかに
記載の窒化物半導体素子。

15 1 4. 前記第2 p型窒化物半導体層のIn組成比は、前記第1
p型窒化物半導体層のIn組成比よりも大きい請求項13に記載の
窒化物半導体素子。

20 1 5. p型窒化物半導体層、n型窒化物半導体層、および、前
記p型窒化物半導体層と前記n型窒化物半導体層との間に挟まれて
いる活性層を備え、前記p型窒化物半導体層は、AlおよびMgを
含む第1 p型窒化物半導体層と、Mgを含む第2 p型窒化物半導体
層とを有し、前記第1 p型窒化物半導体層は、前記活性層と前記第
2 p型窒化物半導体層との間に位置しており、前記第2 p型窒化物
25 半導体層は、前記第1 p型窒化物半導体層のバンドギャップよりも
大きなバンドギャップを有している窒化物半導体素子の製造方法で

あって、

前記 n 型窒化物半導体層を形成する工程と、

前記活性層を形成する工程と、

5 Mg を有する原料ガスおよび Al を有する原料ガスを共に供給することによって、Al および Mg を含む前記第 1 p 型窒化物半導体層を形成する工程と、

Mg を有する原料ガスを供給することによって前記第 2 p 型窒化物半導体層を形成する工程と、

を含む、窒化物半導体素子の製造方法。

10

16. 前記第 1 p 型窒化物半導体層を形成する工程の前に、p 型不純物を供給せずに Al を有する原料ガスを供給することによって、Al を含むノンドープ窒化物半導体層を形成する工程を更に含む、請求項 15 に記載の製造方法。

15

17. 前記第 1 p 型窒化物半導体層の Al 濃度は、 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $2 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 以下であり、

前記第 1 p 型窒化物半導体層において Al 濃度が $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $2 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 以下の領域の厚さは、1 nm 以上である、
20 請求項 15 または 16 に記載の製造方法。

図 1

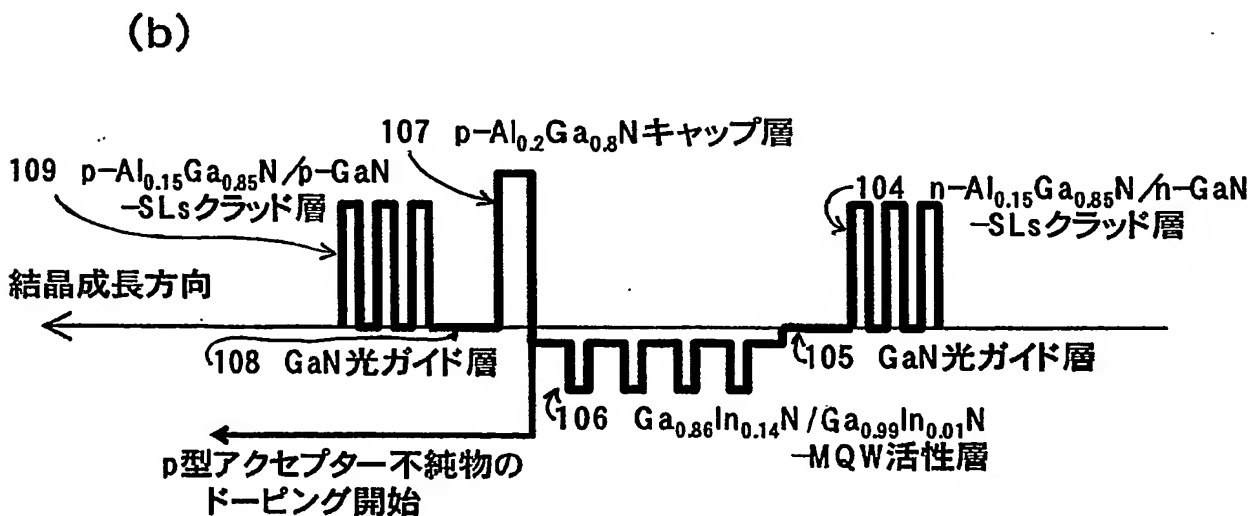
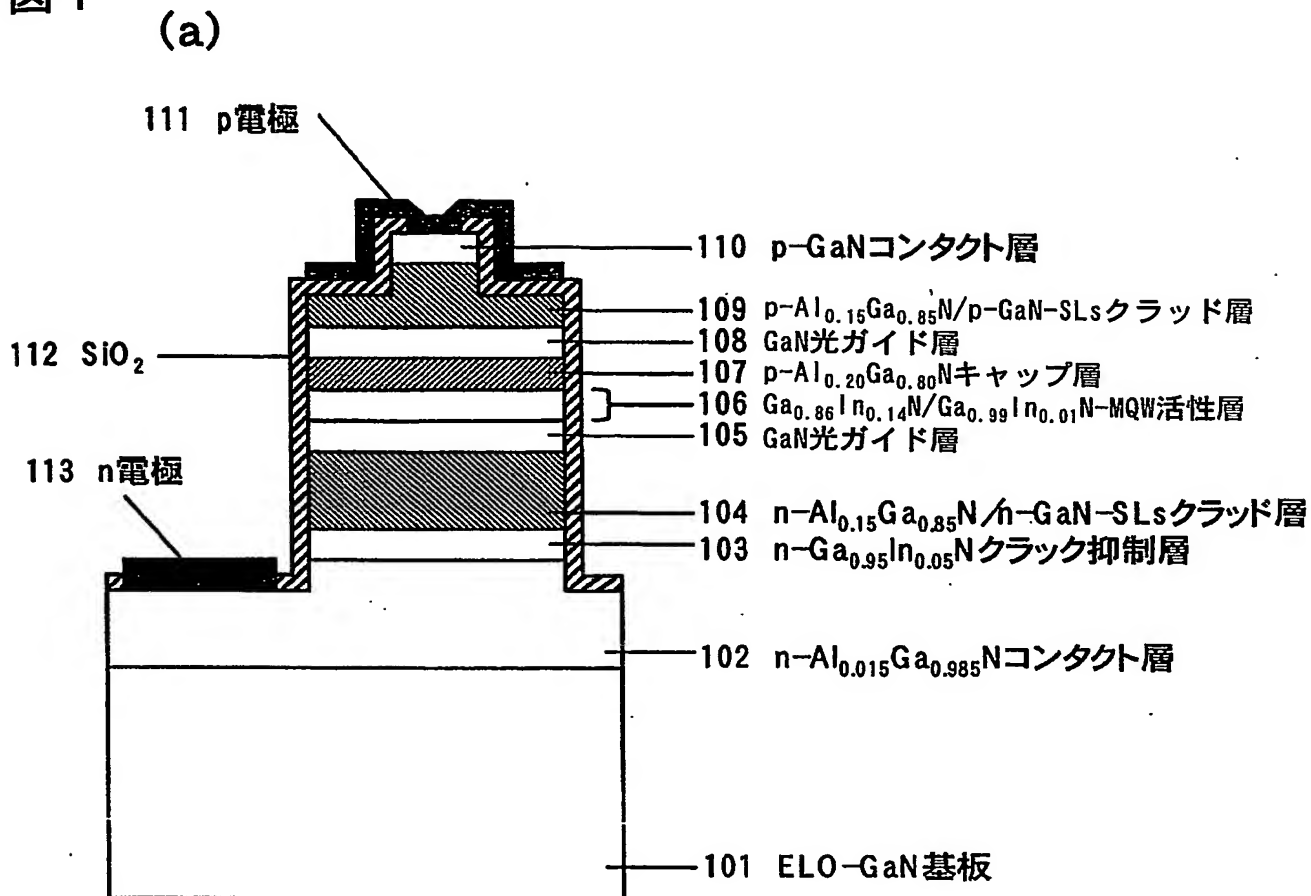


図 2

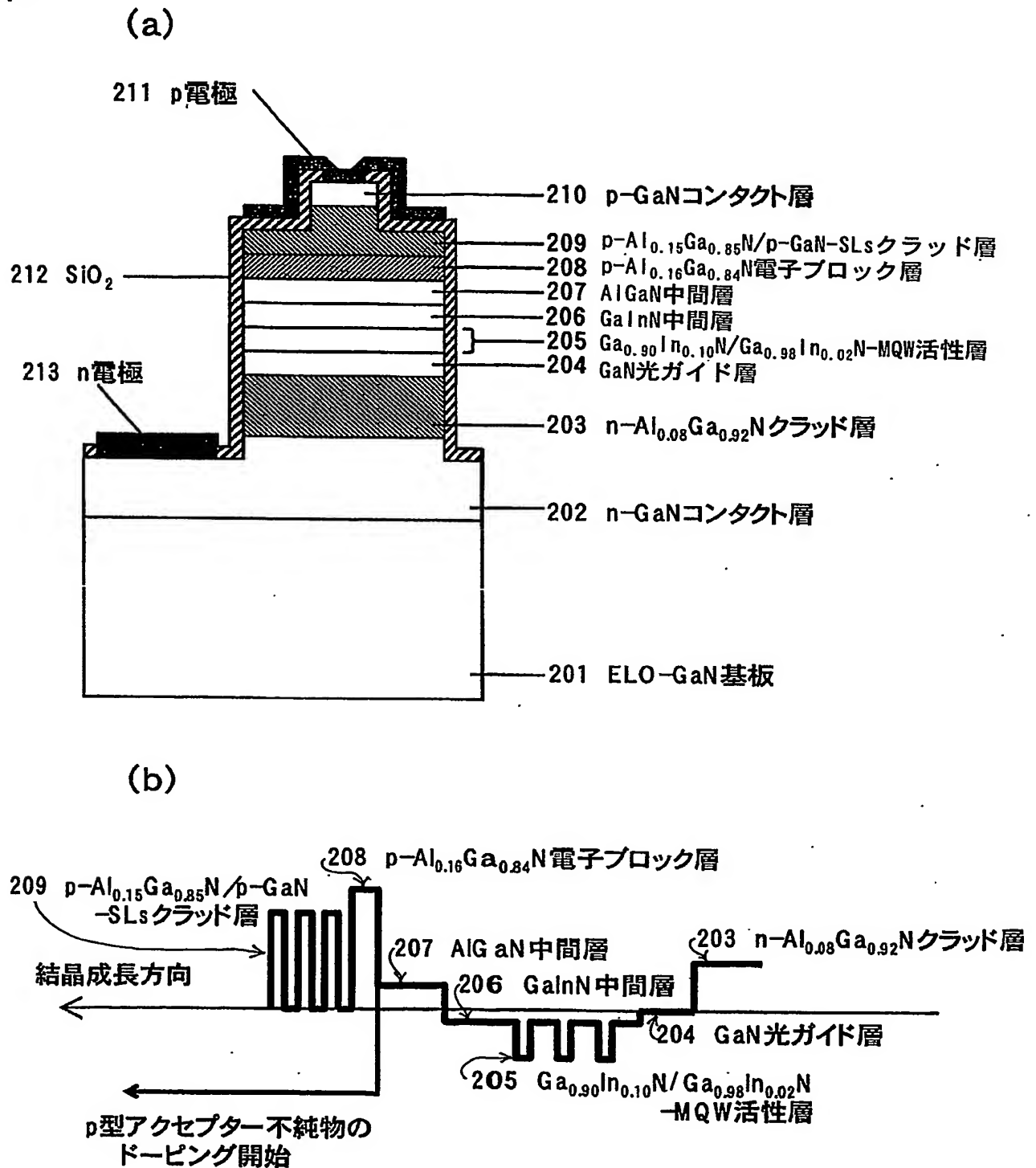


図 3

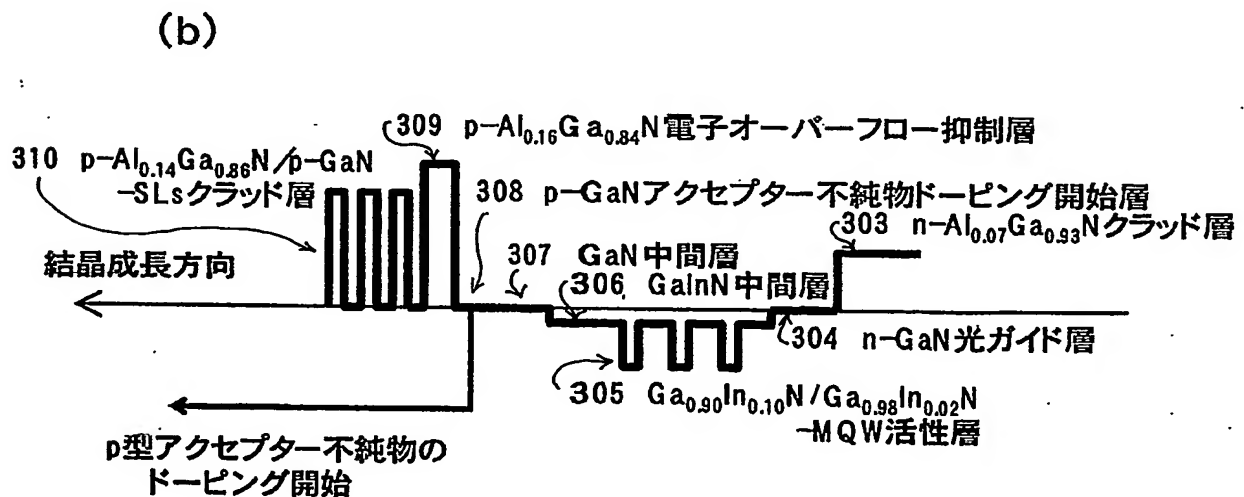
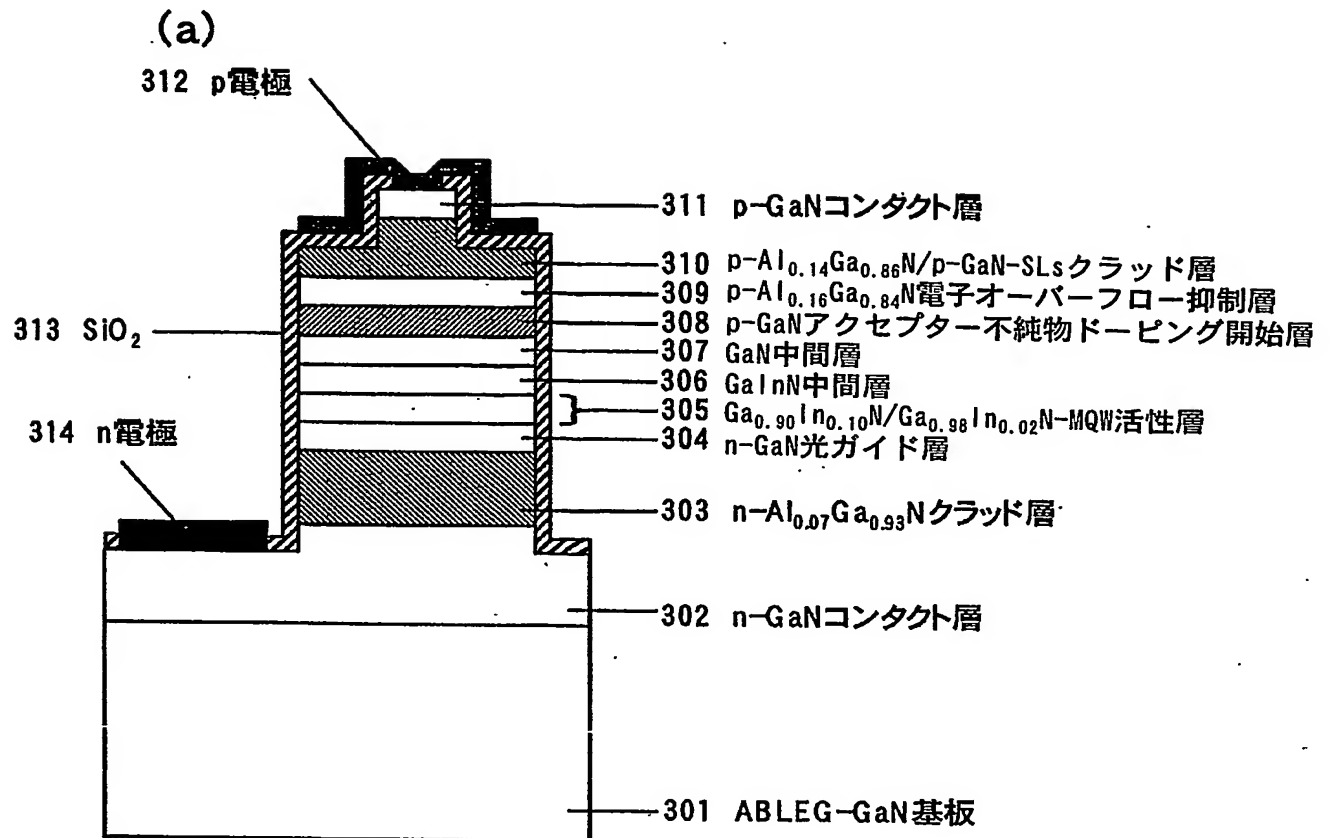


図 4

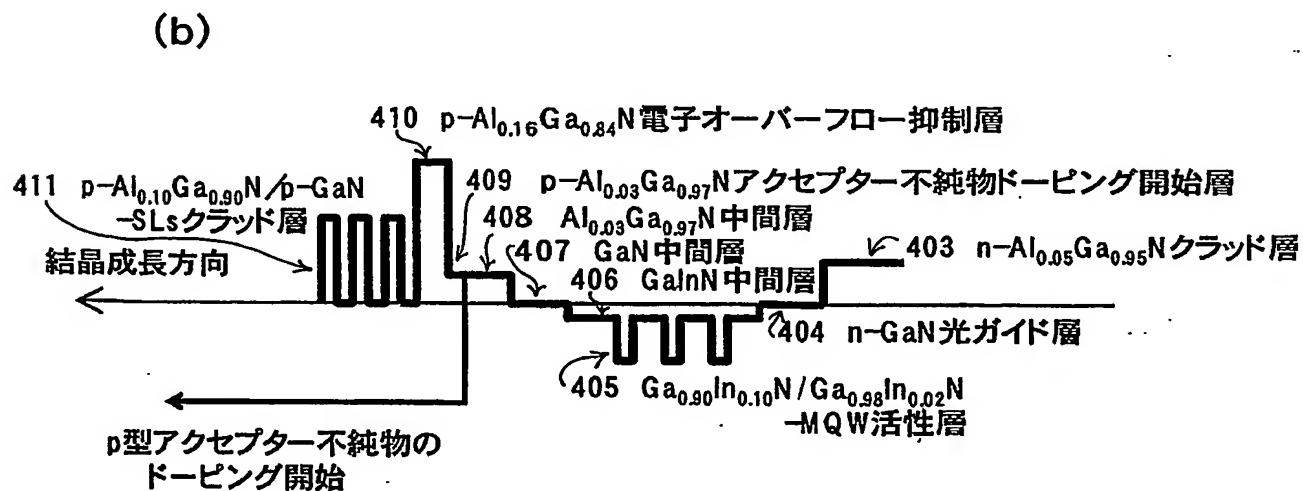
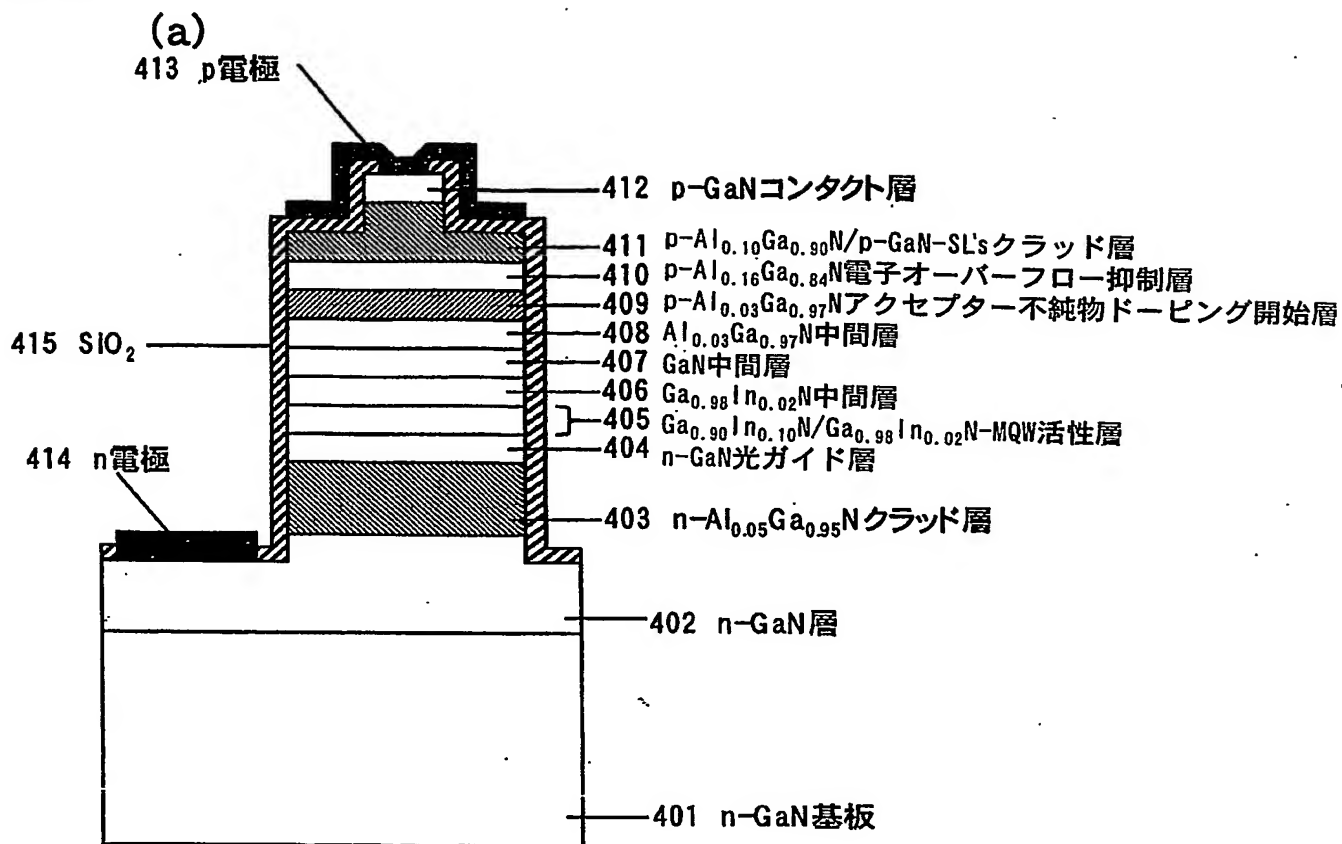


図 5

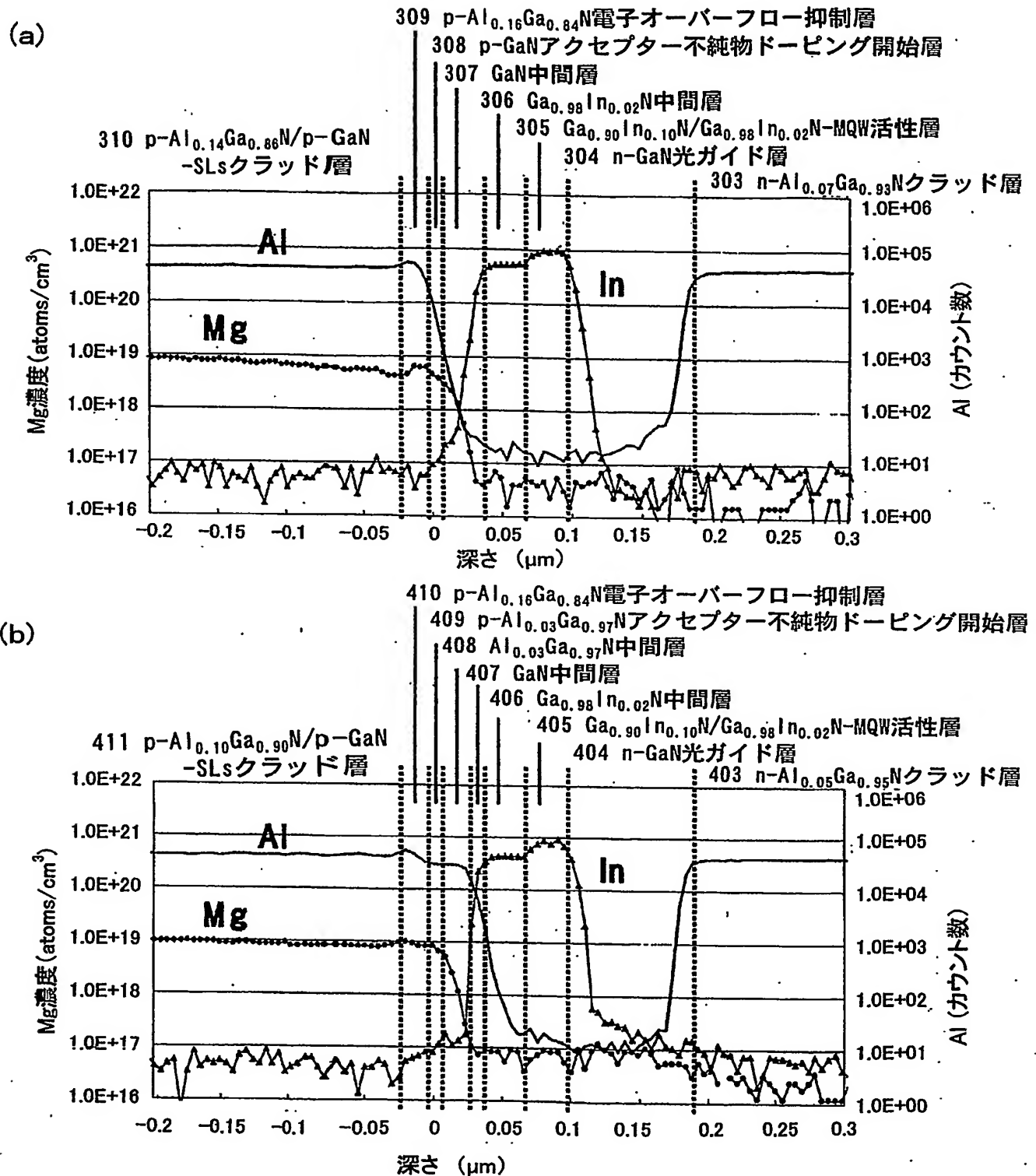


図 6

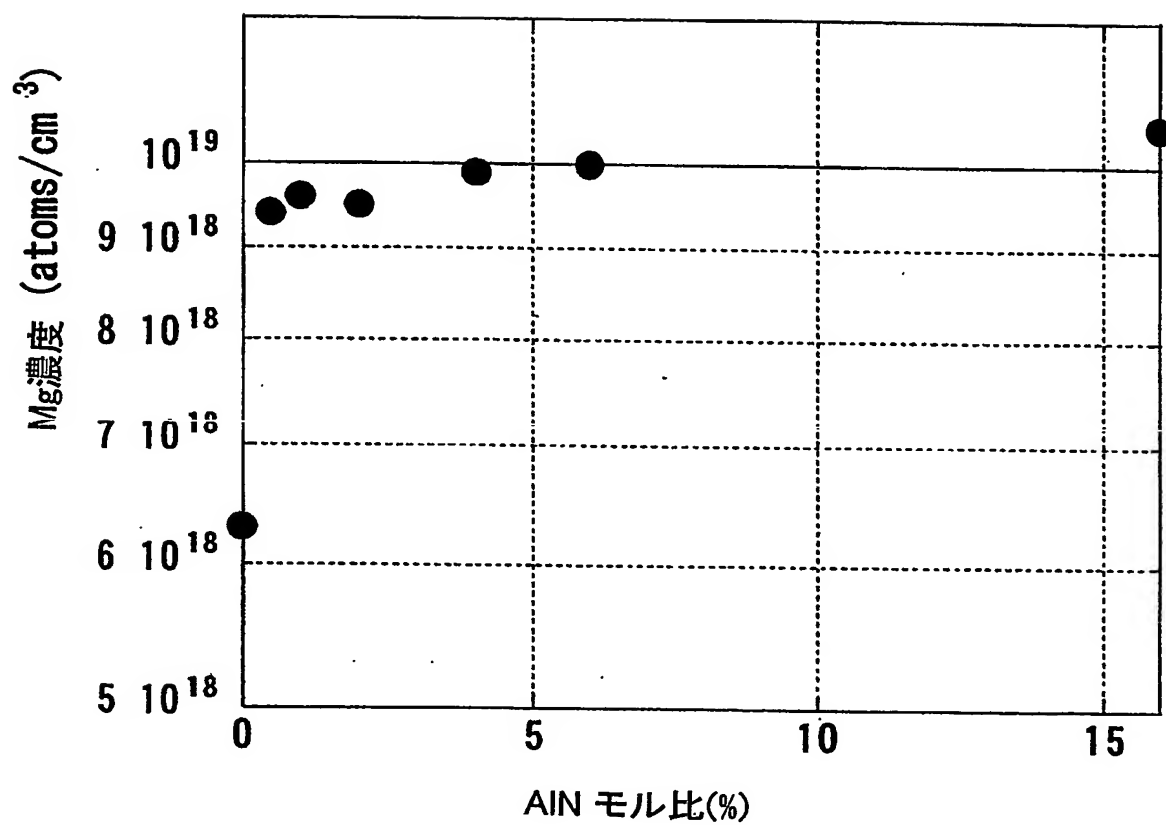


図 7

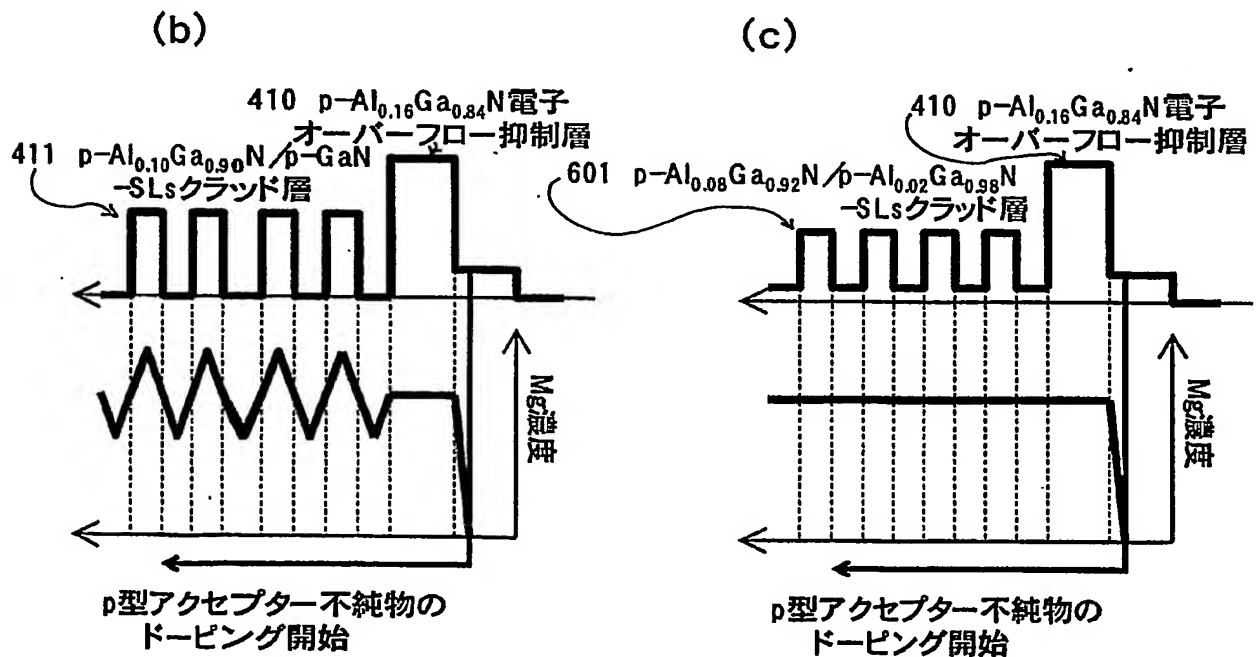
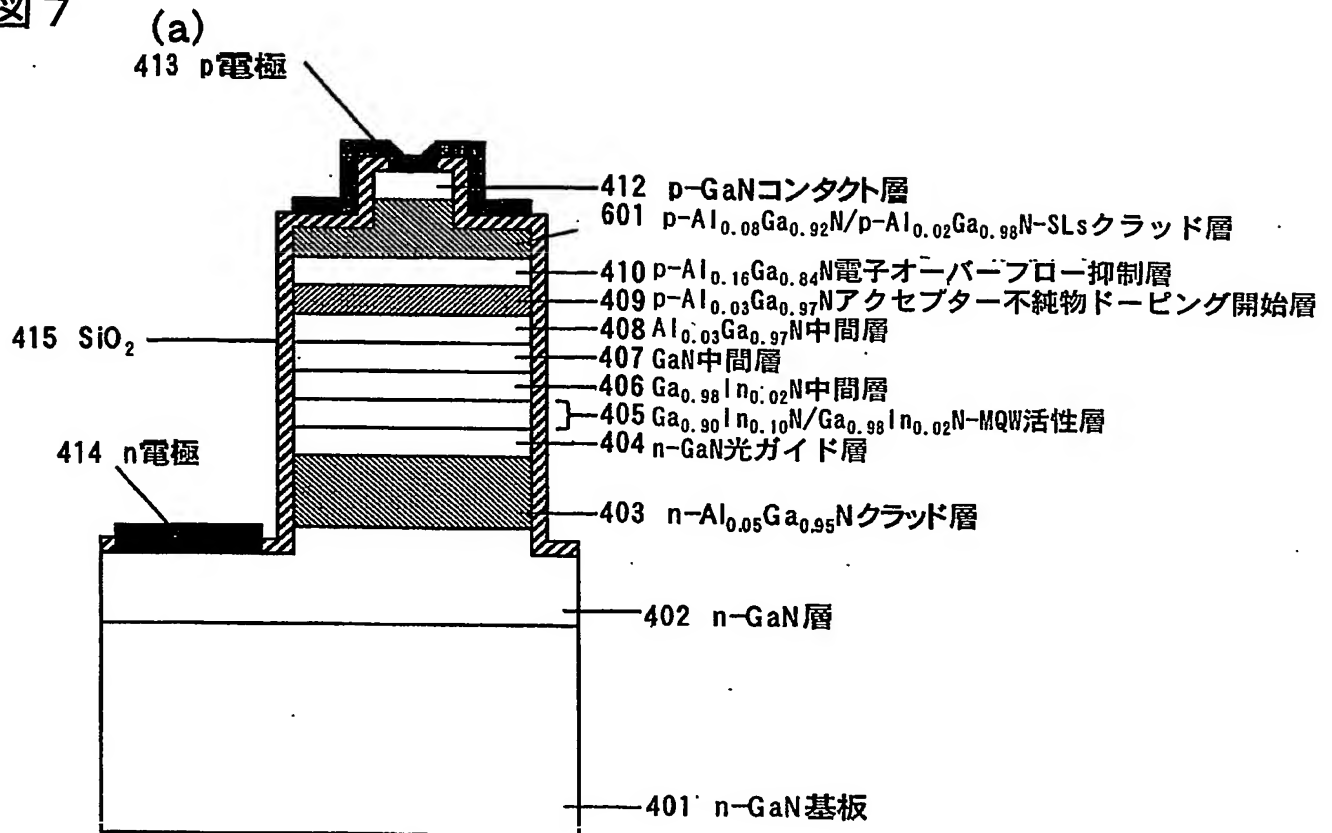


図 8

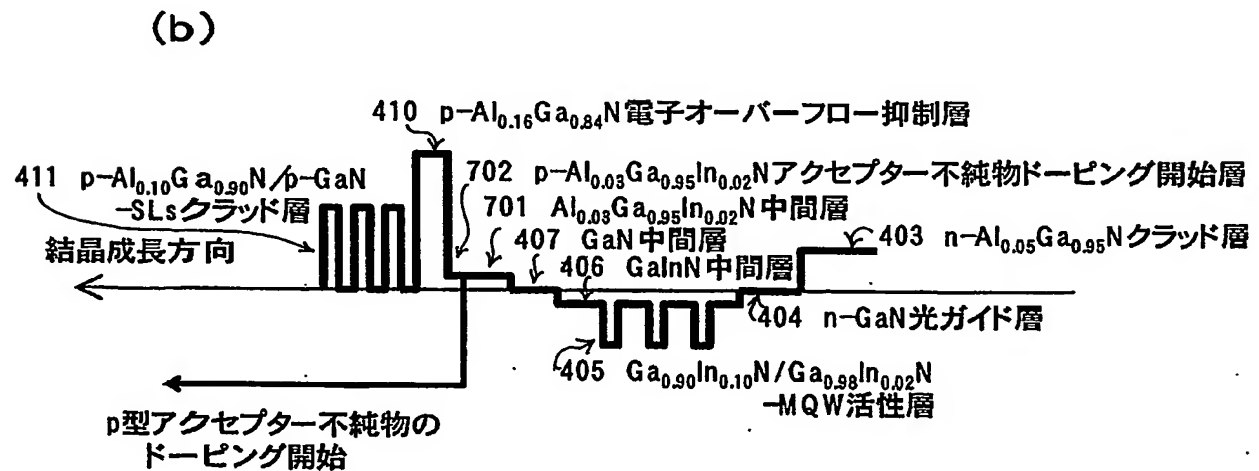
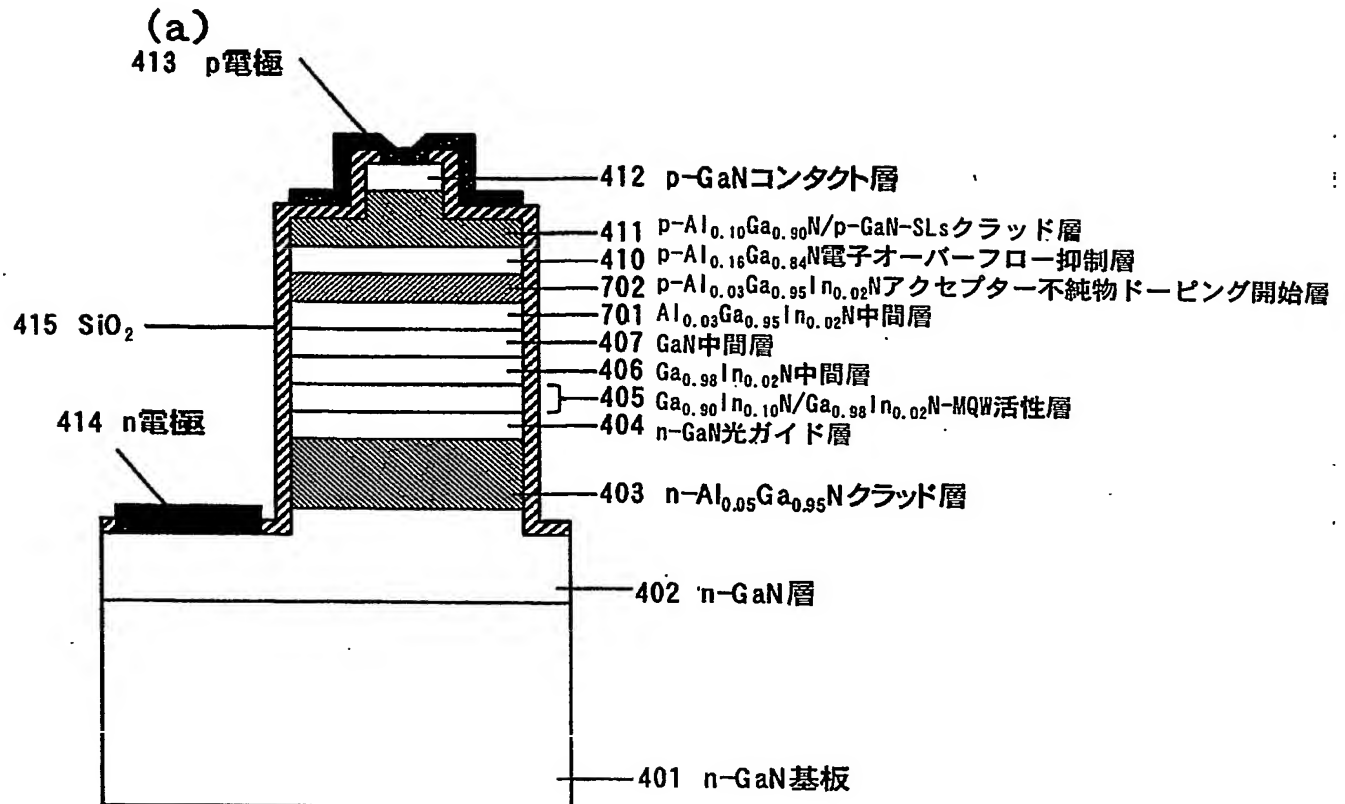


図9.

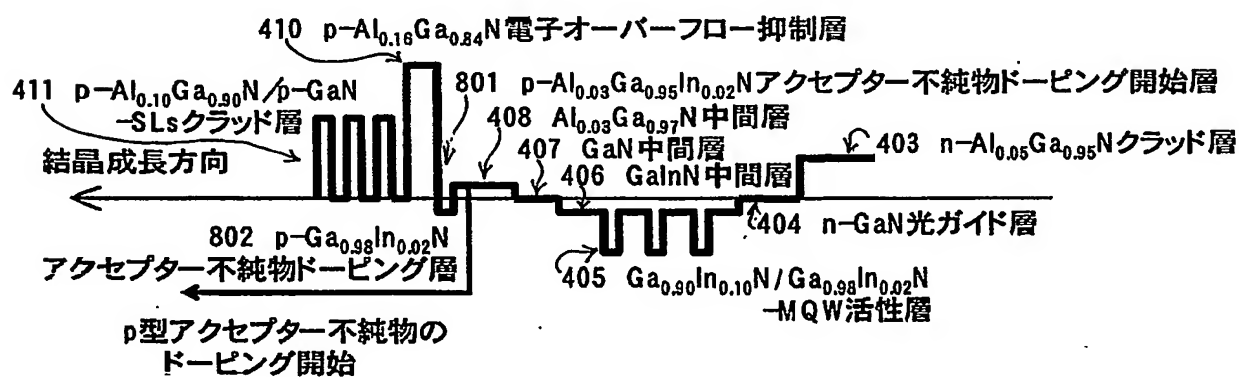
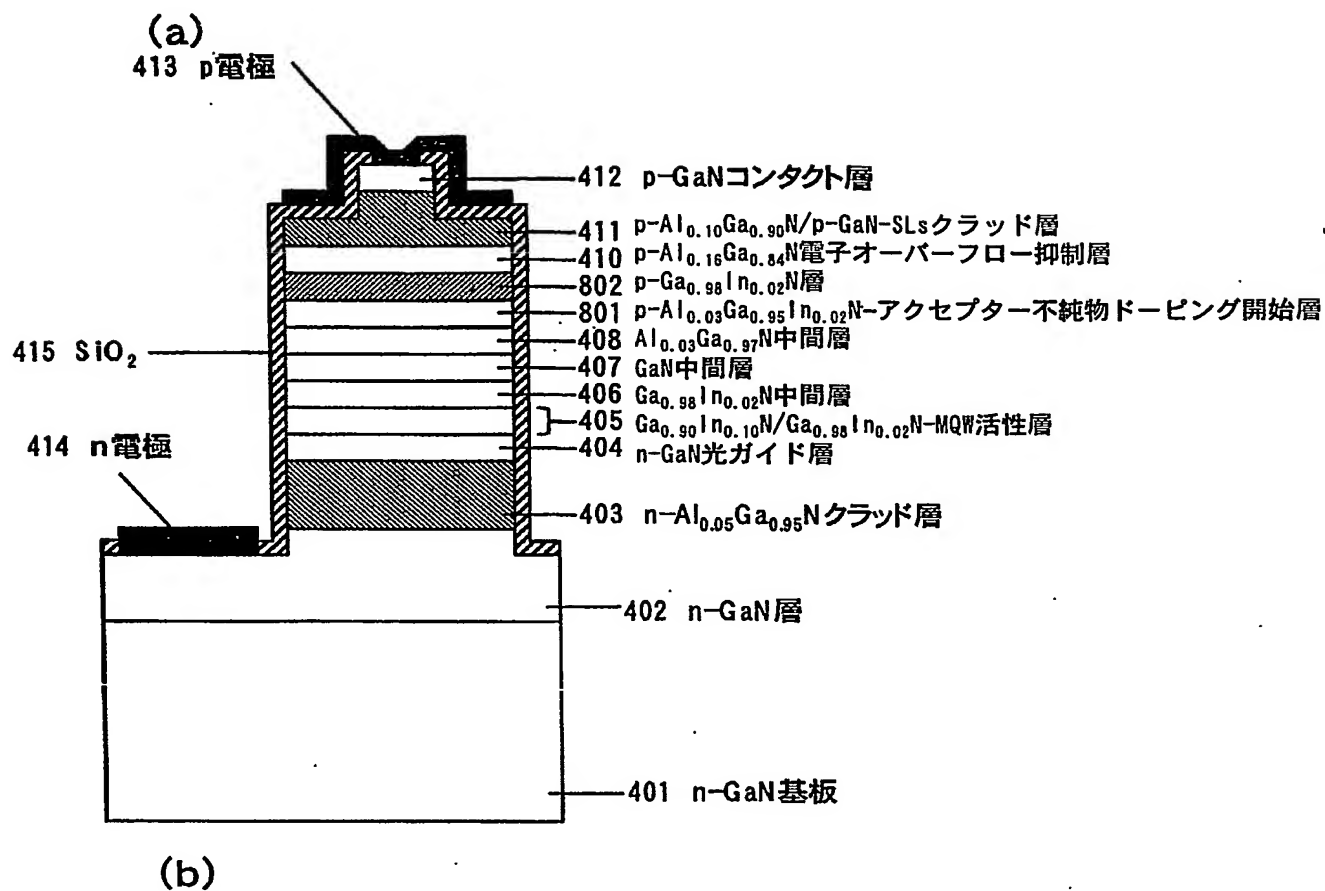
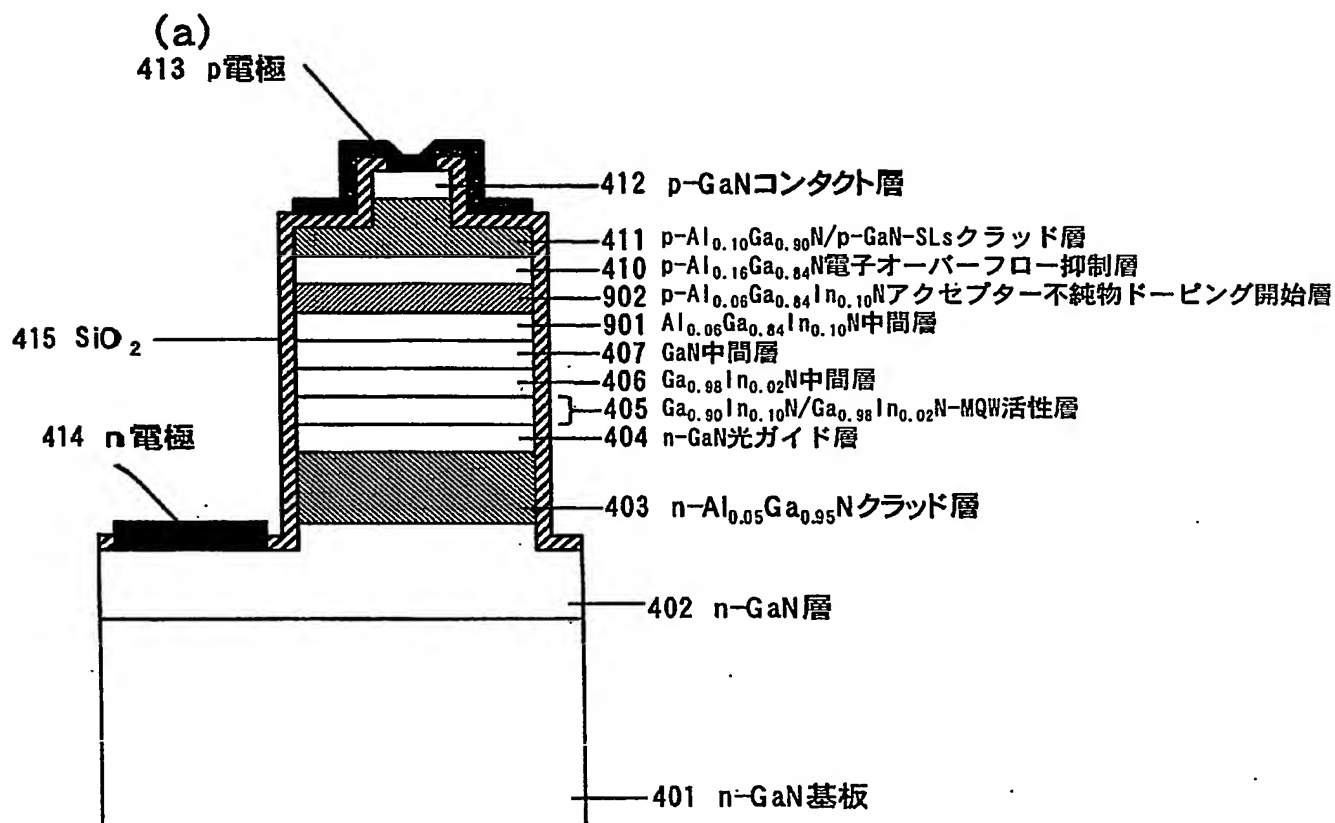


図 10



(b)

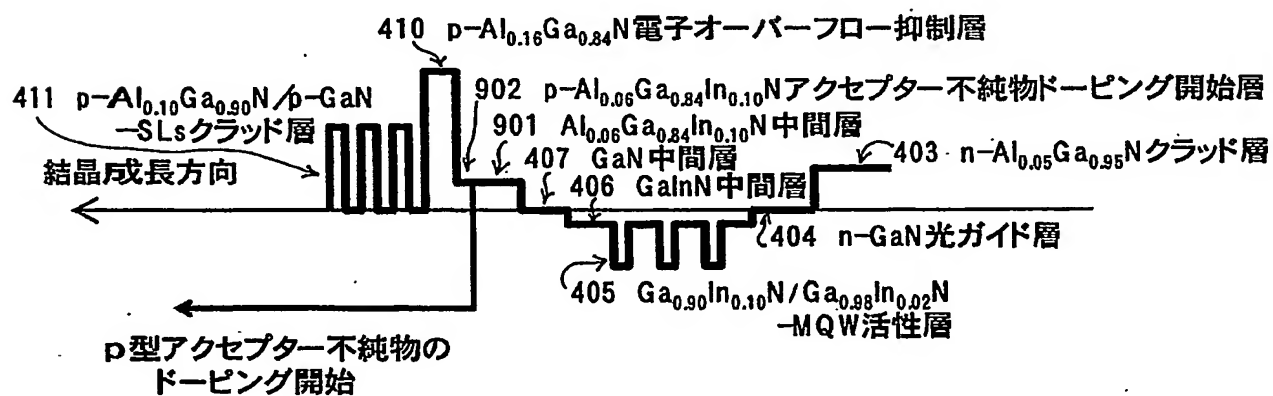


図 11

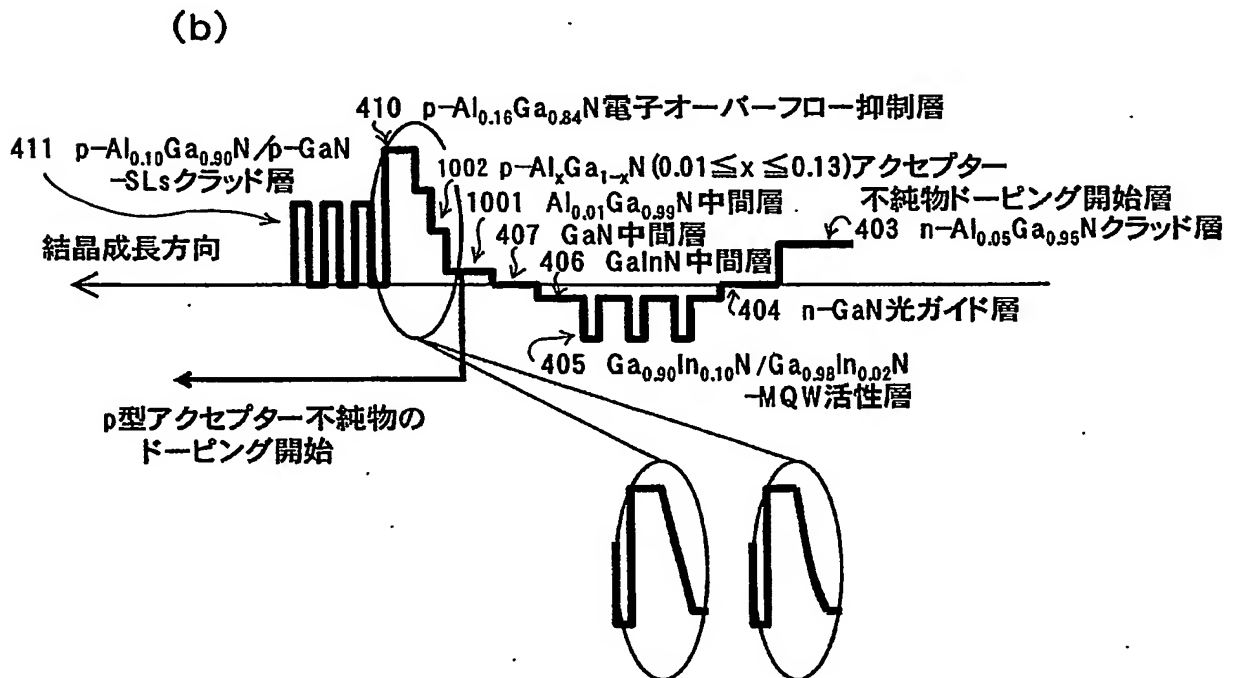
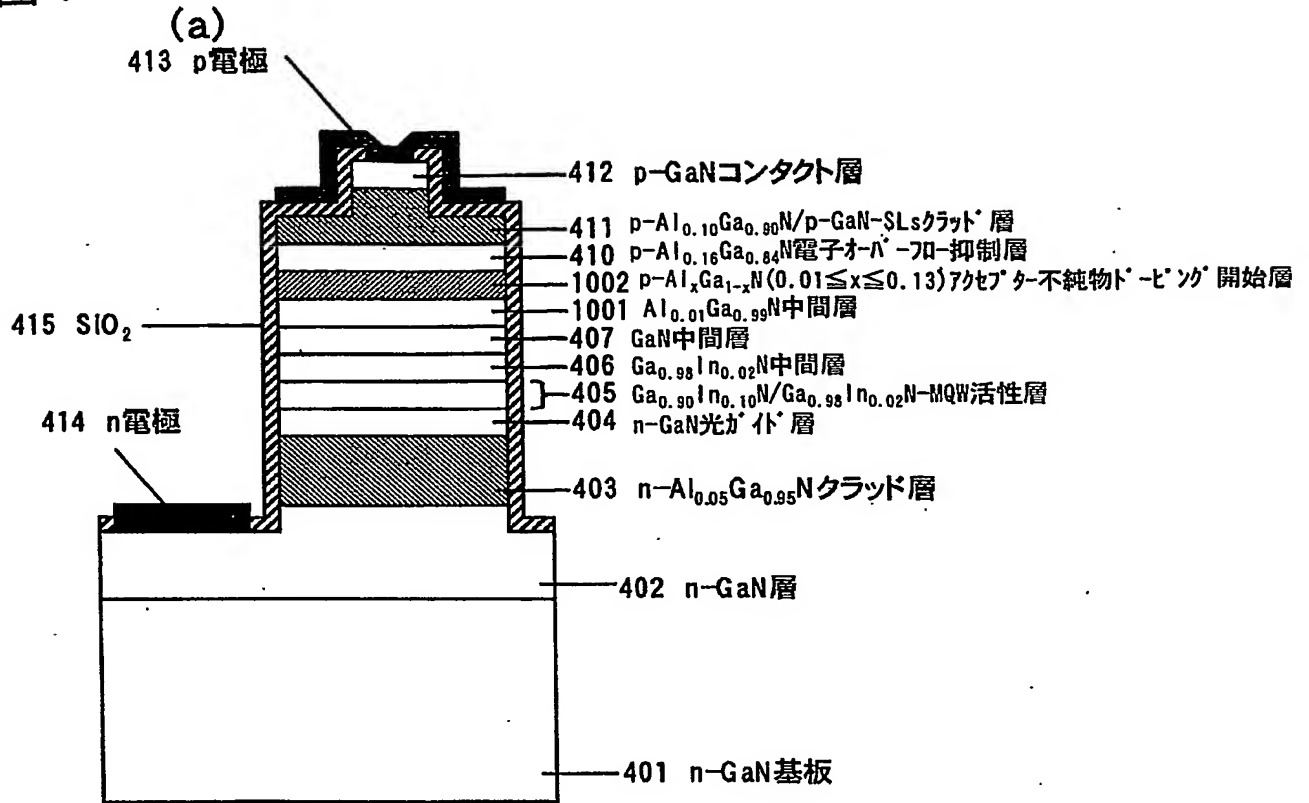


図12

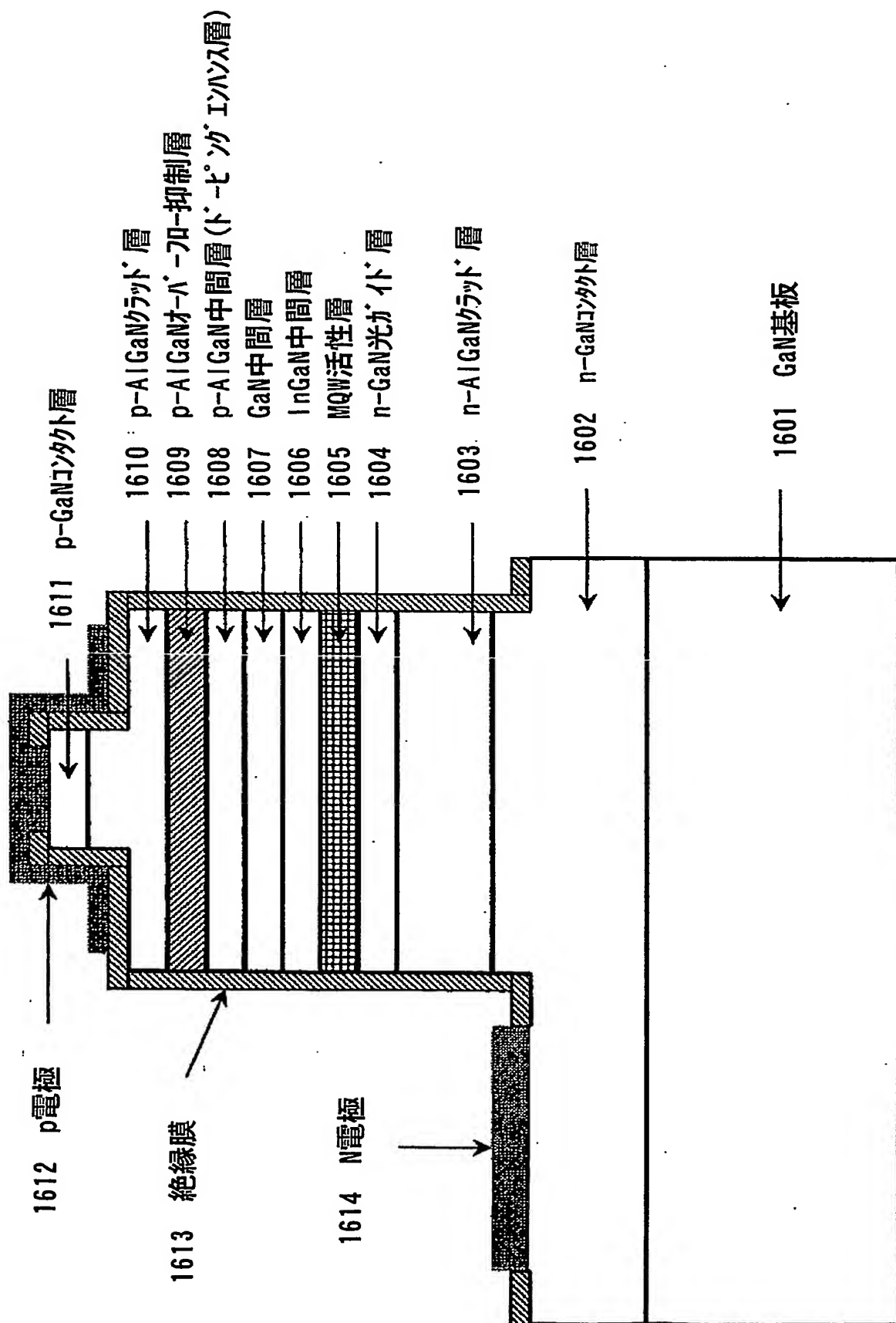


図13

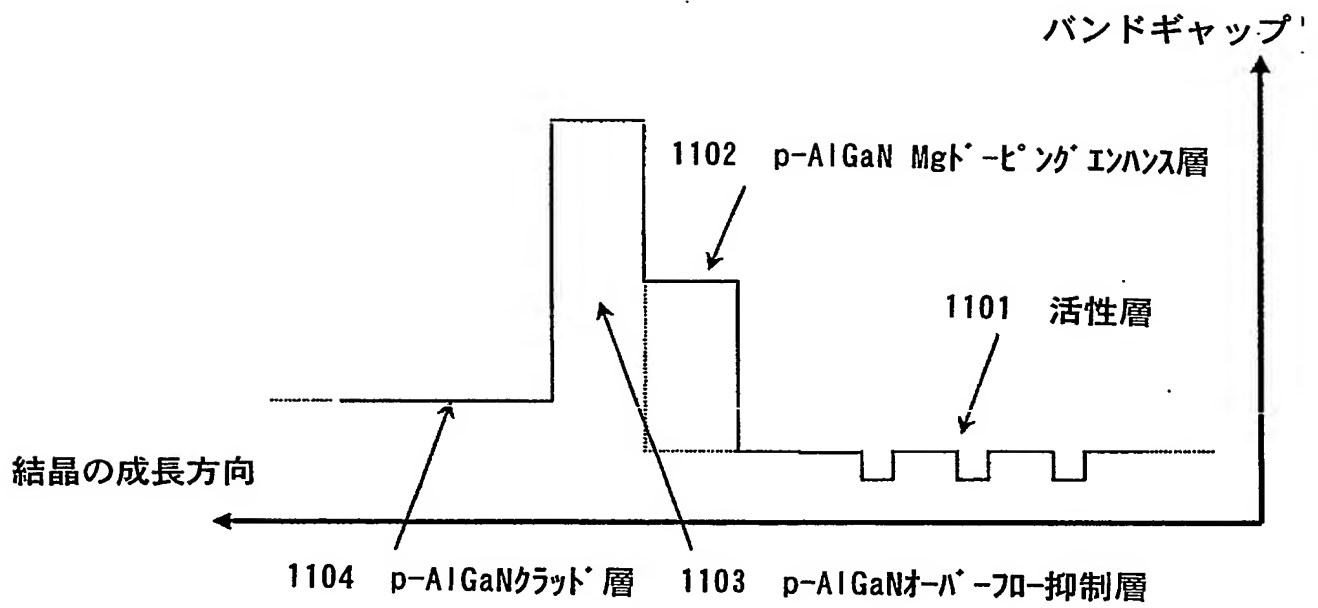


図14

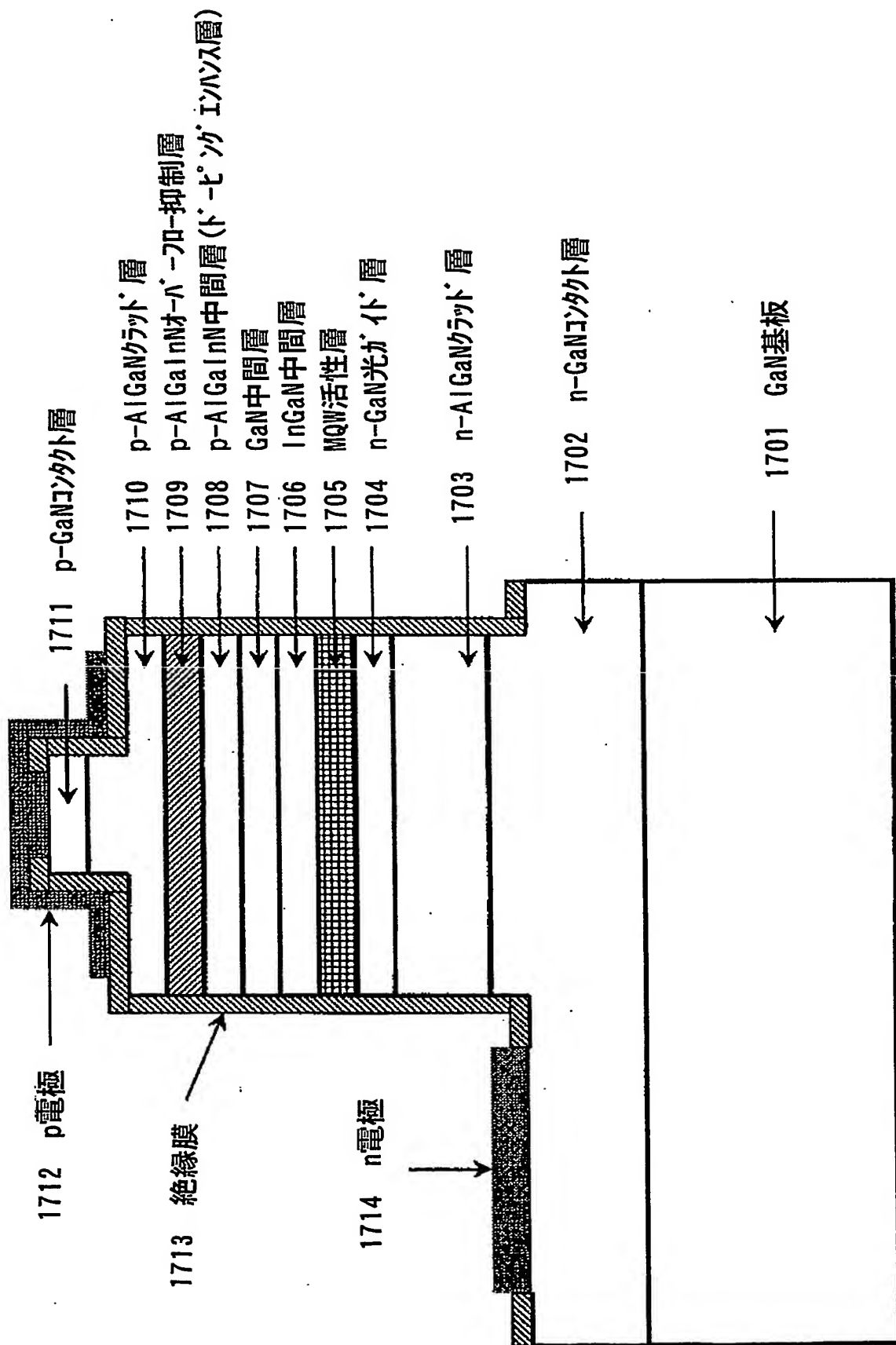


図 15

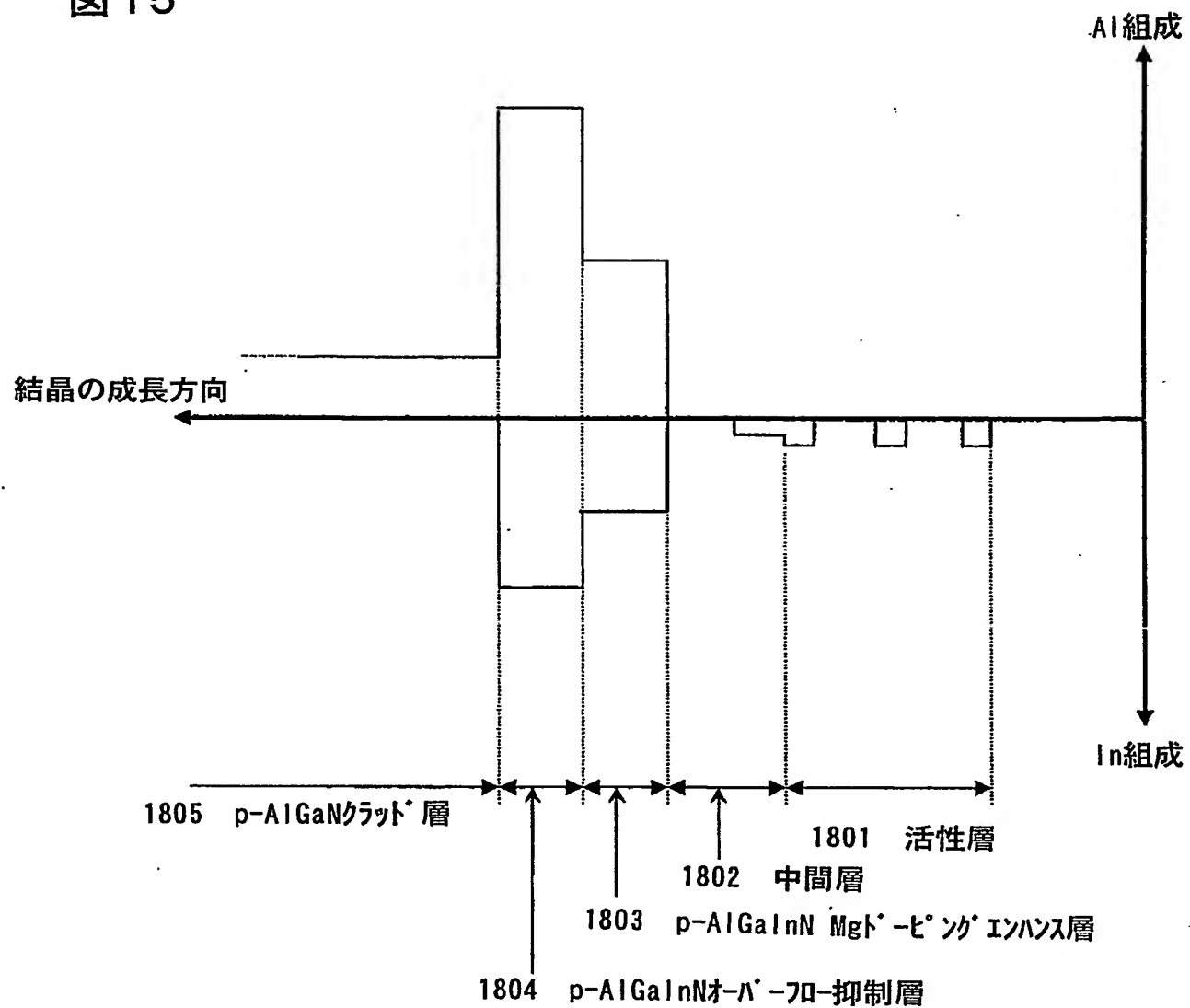
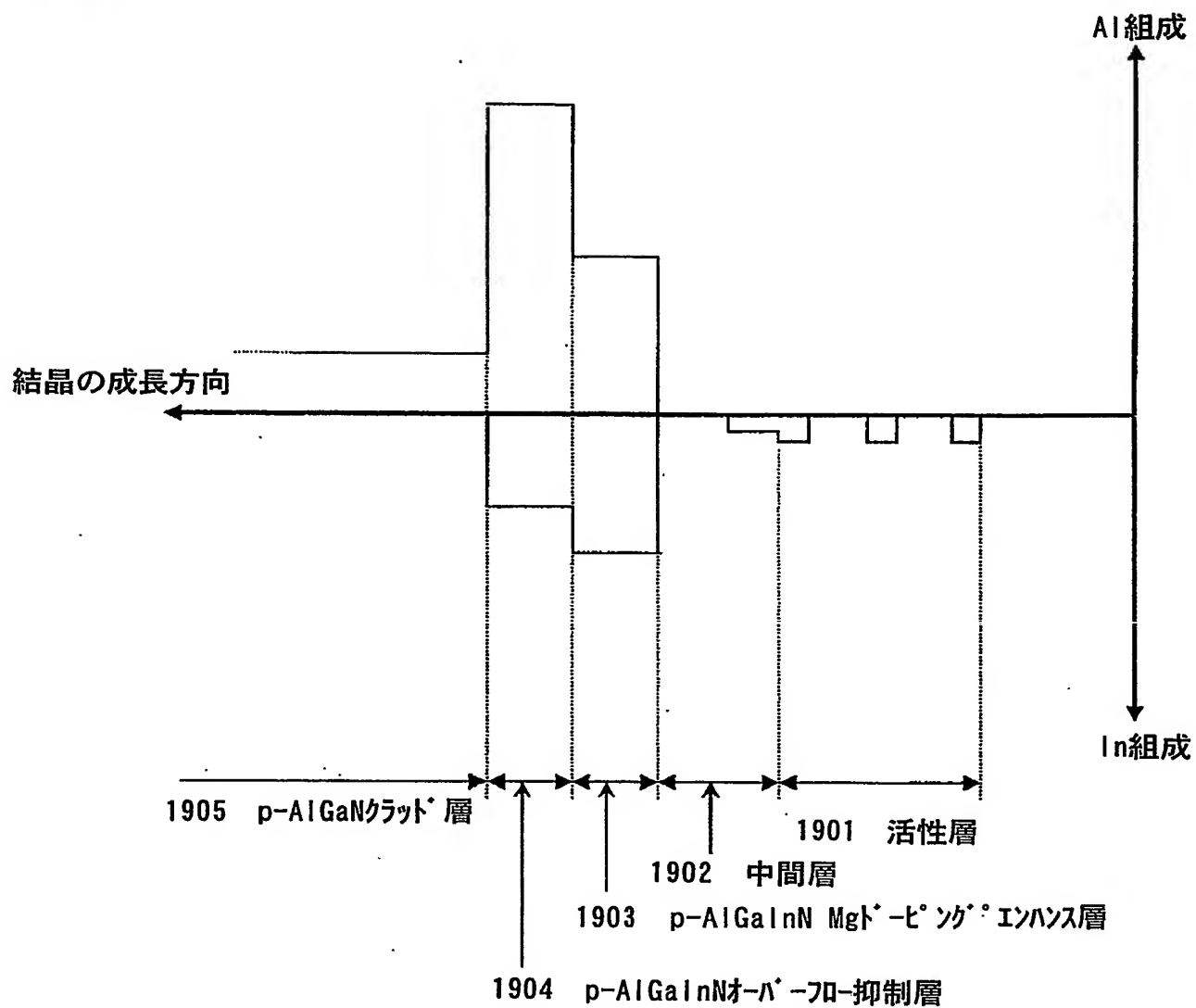


図 16



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2004/014461

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl⁷ H01S5/323, H01L33/00, H01L21/205

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl⁷ H01S5/323, H01L33/00

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2005

Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2005 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2005

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	JP 2002-324913 A (Ricoh Co., Ltd.), 08 November, 2002 (08.11.02), Par. No. [0231]; Fig. 17 (Family: none)	1-2, 10-11, 15
X	JP 10-126010 A (Ricoh Co., Ltd.), 15 May, 1998 (15.05.98), Par. Nos. [0002], [0023]; Fig. 1 (Family: none)	1-2, 10-11, 15
A	JP 2002-314204 A (Ricoh Co., Ltd.), 25 October, 2002 (25.10.02), Par. No. [0033]; Fig. 6 (Family: none)	1-17

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
05 January, 2005 (05.01.05)

Date of mailing of the international search report
25 January, 2005 (25.01.05)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2004/014461

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 8-213692 A (Hitachi, Ltd.), 20 August, 1996 (20.08.96), Full text; all drawings (Family: none)	1-17
A	JP 11-224972 A (Nichia Chemical Industries, Ltd.), 17 August, 1999 (17.08.99), Full text; all drawings (Family: none)	1-17
A	JP 2000-349398 A (Nichia Chemical Industries, Ltd.), 15 December, 2000 (15.12.00), Full text; all drawings (Family: none)	1-17
A	JP 10-144962 A (Toshiba Corp.), 29 May, 1998 (29.05.98), Full text; all drawings (Family: none)	1-17
A	JP 2002-111135 A (The Furukawa Electric Co., Ltd.), 12 April, 2002 (12.04.02), Full text; all drawings & US 2002/0041613 A1	1-17

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl⁷ H01S5/323, H01L33/00, H01L21/205

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl⁷ H01S5/323, H01L33/00

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2005年
日本国登録実用新案公報	1994-2005年
日本国実用新案登録公報	1996-2005年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
X	JP 2002-324913 A(株式会社リコー), 2002. 11. 08, [0231], 図17 (ファミリーなし)	1-2, 10-11, 15
X	JP 10-126010 A(株式会社リコー), 1998. 05. 15, [0002] [0023], 図1 (ファミリーなし)	1-2, 10-11, 15
A	JP 2002-314204 A(株式会社リコー), 2002. 10. 25, [0033], 図6 (ファミリーなし)	1-17

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

05. 01. 2005

国際調査報告の発送日

25. 1. 2005

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)
郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

吉野 三寛

2K

9010

電話番号 03-3581-1101 内線 3253

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
A	JP 8-213692 A(株式会社日立製作所), 1996. 08. 20, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-17
A	JP 11-224972 A(日亜化学工業株式会社), 1999. 08. 17, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-17
A	JP 2000-349398 A(日亜化学工業株式会社), 2000. 12. 15, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-17
A	JP 10-144962 A(株式会社東芝), 1998. 05. 29, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-17
A	JP 2002-111135 A(古川電気工業株式会社), 2002. 04. 12, 全文, 全図 & US 2002/0041613 A1	1-17